

ESTUDIO PARA LA INTEGRACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN SISTEMAS  
DE RIEGO EN CULTIVOS DE CÍTRICOS PARA LA REDUCCIÓN DE CONSUMO  
ENERGÉTICO EN GIRÓN

JHONN ALEXANDER ACOSTA CALDERÓN

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA EN ENERGÍA  
BUCARAMANGA, SANTANDER COLOMBIA

2020

ESTUDIO PARA LA INTEGRACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN SISTEMAS  
DE RIEGO EN CULTIVOS DE CÍTRICOS PARA LA REDUCCIÓN DE CONSUMO  
ENERGÉTICO EN GIRÓN

JHONN ALEXANDER ACOSTA CALDERON

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ENERGÍA

DIRECTOR

Ing. MSc.PhD. YECID ALFONSO MUÑOZ MALDONADO

CODIRECTOR

Ing. MSc. MARIO JONATAN ACERO CABALLERO

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA EN ENERGIA

BUCARAMANGA

2020

NOTA DE ACEPTACION

---

---

---

---

FIRMA DIRECTOR

---

FIRMA EVALUADOR

---

FIRMA EVALUADOR

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco en primera instancia a Dios, por permitirme culminar esta etapa de mi vida, llena de momentos que me enriquecieron e hicieron como profesional, y en especial por darme sabiduría y disciplina para el desarrollo de este proyecto. A mis padres, que siempre me impulsaron educándome como persona y dándome fuerza para seguir en mi educación, siempre aplicando su frase: ¡la educación es lo único que le deja un padre a su hijo!. A mi familia en general, que de una u otra manera estuvieron a mi lado alentándome a cumplir este propósito en mi vida. Por último, y no menos importante, a mi director y co-director de proyecto por brindarme sus conocimientos, guía y experiencia para llevar a buen término este trabajo.

*Jhonn Alexander Acosta Calderón*

*Cabrera, Santander*

## TABLA DE CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| RESUMEN.....  | 10 |
| INTRODUCCIÓN .....  | 12 |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....  | 14 |
| 1 OBJETIVOS .....   | 15 |
| 2 MARCO TEORICO .....   | 16 |
| 2.1 Sistemas fotovoltaicos de bombeo .....  | 16 |
| 2.1.1 Sistema fotovoltaico de bombeo conectado a Red.....   | 17 |
| 2.1.2 Sistema fotovoltaico de bombeo aislado.....   | 18 |
| 2.2 Determinación de necesidades netas de riego .....   | 21 |
| 2.3 Determinación del caudal a bombear con el sistema fotovoltaico .....  | 25 |
| 2.4 Determinación de las perdidas hidráulicas .....   | 28 |
| 2.5 Dimensionamiento del sistema de bombeo fotovoltaico.....  | 31 |
| 2.6 Determinación del costo energético de los sistemas actuales .....   | 35 |
| 3 ESTADO DEL ARTE .....   | 37 |
| 4 METODOLOGIA.....  | 39 |
| 5 DESARROLLO .....  | 41 |
| 5.1 Caracterización de los sistemas de bombeo actuales .....  | 42 |
| 5.2 Determinación de necesidades netas de riego .....   | 46 |
| 5.2.1 Determinación del caudal a bombear en el sistema fotovoltaico.....  | 49 |
| 6 RESULTADOS .....  | 52 |
| 6.1 Sistemas fotovoltaicos de bombeo dimensionado con las características de los sistemas de bombeo actuales en Chocóa y Chocoita ..... | 52 |
| 6.1.1 Análisis de pérdidas hidráulicas en el sistema de bombeo fotovoltaico .....   | 52 |
| 6.1.2 Potencia eléctrica en el sistema de bombeo fotovoltaico.....  | 53 |
| 6.1.3 Eficiencia del sistema de bombeo fotovoltaico.....  | 53 |
| 6.1.4 Potencia pico a instalar de módulos fotovoltaico en el sistema de bombeo solar.....   | 54 |
| 6.1.5 Número de paneles en el sistema de bombeo fotovoltaico .....  | 55 |
| 6.1.6 Vereda Chocóa.....  | 56 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 6.1.7 | Vereda Chocoita.....   | 58 |
| 6.2   | Dimensionado del sistema de bombeo fotovoltaico con los requisitos de la ADR en las veredas de Girón. ....       | 61 |
| 6.2.1 | Potencia eléctrica de las bombas solares en las veredas de Girón .....   | 61 |
| 6.2.2 | Eficiencia de las bombas solares en las veredas de Girón .....   | 62 |
| 6.2.3 | Potencia pico a instalar de módulos fotovoltaicos en las veredas de Girón... ..                                  | 63 |
| 6.2.4 | Número de paneles a instalar en las veredas de Girón con la bomba de mejor rendimiento.....                      | 64 |
| 6.2.5 | Número de paneles en serie y paralelo.....   | 65 |
| 6.2.6 | Capacidad de corriente de los conductores y disparo de protecciones .....  | 66 |
| 6.2.7 | Angulo de inclinación de los paneles del sistema fotovoltaico en las veredas de Girón.....                       | 67 |
| 6.3   | Costo energético mensual y costo total por hectárea de los sistemas actuales de bombeo en Chocoa y Chocoita..... | 69 |
| 6.4   | Costo de operación y mantenimiento anual de los sistemas de bombeo fotovoltaico.....                             | 70 |
| 6.5   | Ahorro anual por la integración del sistema de bombeo fotovoltaico.....  | 71 |
| 7     | CONCLUSIONES .....   | 73 |
| 8     | RECOMENDACIONES.....   | 74 |
|       | BIBLIOGRAFIA .....   | 75 |
|       | ANEXOS .....   | 77 |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1.-Número de beneficiarios por vereda en Girón. Fuente: propia .....   | 42 |
| Tabla 2.-Datos del sistema Chocoa 17. Fuente: propia.....  | 42 |
| Tabla 3.-Datos generales sistema actual. Fuente: propia. ....  | 43 |
| Tabla 4.-Punto de operación del sistema actual Chocoa 17. Fuente: propia.....  | 44 |
| Tabla 5.-Bombeo al mes del sistema actual Chocoa 17. Fuente: propia.....   | 44 |
| Tabla 6.-Punto de funcionamiento de los sistemas actuales. Fuente: propia. ....  | 45 |
| Tabla 7.-Caudal bombeado al día y al mes en los sistemas actuales de Chocoa y Chocoita.<br>Fuente: propia.....                 | 46 |
| Tabla 8.-Datos meteorológicos mensuales de Chocoa. Fuente: propia. ....  | 47 |
| Tabla 9.-Radiación Solar incidente en Chocoa. Fuente: propia.....  | 47 |
| Tabla 10.-Evapotranspiración Potencial en Chocoa. Fuente: propia. ....   | 48 |
| Tabla 11.-Precipitación Efectiva en Chocoa. Fuente: propia.....  | 48 |
| Tabla 12.-Necesidades Netas de Riego en Chocoa. Fuente: propia.....  | 49 |
| Tabla 13.-Energía Hidráulica a partir de las necesidades netas de riego en Chocoa. Fuente:<br>propia.....                      | 49 |
| Tabla 14.-Mes de Dimensionamiento en Chocoa. Fuente: propia. ....  | 50 |
| Tabla 15.-Caudal a bombear del sistema fotovoltaico en Chocoa. Fuente: propia.....   | 50 |
| Tabla 16.-Necesidades netas de riego en las veredas de Girón. Fuente: propia. ....   | 51 |
| Tabla 17.-Datos generales sistema fotovoltaico. Fuente: propia. ....   | 52 |
| Tabla 18.-Punto de operación del sistema fotovoltaico en Chocoa 17 con las 3 bombas<br>solares. Fuente: propia. ....           | 53 |
| Tabla 19.-Potencia eléctrica de las bombas solares en el sistema Chocoa 17. Fuente: propia<br>.....                            | 53 |
| Tabla 20.- Potencia de fluido y eficiencia de las bombas solares en Chocoa 17. Fuente:<br>propia.....                          | 54 |
| Tabla 21.-Potencia pico a instalar de módulos fotovoltaicos en Chocoa 17. Fuente: propia.<br>.....                             | 55 |
| Tabla 22.-Numero de paneles a instalar con diferentes potencias de módulos fotovoltaicos en<br>Chocoa 17. Fuente: propia. .... | 55 |
| Tabla 23.-Punto de funcionamiento de las bombas solares en los sistemas de la vereda<br>Chocoa. Fuente: propia. ....           | 56 |
| Tabla 24.- Eficiencia y potencia pico para la vereda Chocoa. Fuente: propia.....   | 57 |
| Tabla 25.-Numero de paneles a instalar en los sistemas de la vereda Chocoa. Fuente: propia.<br>.....                           | 58 |
| Tabla 26.-Punto de funcionamiento de las bombas solares en los sistemas de la vereda<br>Chocoita. Fuente: propia. ....         | 59 |
| Tabla 27.-Eficiencia y potencia pico a instalar en los sistemas de la vereda Chocoita. Fuente:<br>propia.....                  | 60 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 28.-Numero de paneles en los sistemas de la vereda Chocoita. Fuente: propia. ....   | 61 |
| Tabla 29.-Potencia eléctrica de las bombas solares en las veredas de Girón. Fuente: propia.<br>.....                              | 62 |
| Tabla 30.- Potencia del fluido y Eficiencia de las bombas solares en las veredas de Girón.<br>Fuente: propia.....                 | 62 |
| Tabla 31.-Performance ratio del sistema fotovoltaico en cada vereda de Girón. Fuente: propia<br>a partir de Software PVsyst. .... | 63 |
| Tabla 32.-Potencia pico a instalar de módulos fotovoltaicos en las veredas de Girón. Fuente:<br>propia.....                       | 64 |
| Tabla 33.-Numero de paneles a instalar en las veredas de Girón. Fuente: propia. ....  | 65 |
| Tabla 34.-Datos del panel y el controlador de carga. Fuente: propia. ....   | 65 |
| Tabla 35.-Numero de paneles en serie y paralelo. Fuente: propia. ....   | 66 |
| Tabla 36.-Corriente del arreglo fotovoltaico. Fuente: propia. ....  | 66 |
| Tabla 37.-Angulo de inclinación. Fuente: propia.....  | 68 |
| Tabla 38.-Costo energético mensual de los sistemas actuales de bombeo en Chocóa y<br>Chocoita. Fuente: propia. ....               | 69 |
| Tabla 39.-Costo total anual de los sistemas actuales de bombeo en Chocóa y Chocoita.<br>Fuente: propia.....                       | 70 |
| Tabla 40.-Costo de operación y mantenimiento de los sistemas de bombeo fotovoltaico.<br>Fuente: propia.....                       | 71 |
| Tabla 41.-Ahorro anual en los sistemas por la implementación de bombeo fotovoltaico en<br>Chocóa y Chocoita. Fuente: propia. .... | 71 |



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.-Grafico para selección de diferentes fuentes de energía para uso en bombeo. Fuente: Sistemas de Bombeo Fotovoltaico [2].   | 16 |
| Figura 2.-Campo de aplicación de distintas bombas para sistemas fotovoltaicos de bombeo. Fuente: Water pumping: The Solar Alternative [3].   | 17 |
| Figura 3-Componentes de un Sistema Fotovoltaico de Riego conectado a Red. Fuente: Manual de eficiencia energética en el sector de la fruta fresca en Chile [4].                              | 18 |
| Figura 4-Componentes de Sistema Fotovoltaico de Riego aislado. Fuente: Manual de Eficiencia energética de la fruta fresca en Chile [4].  | 19 |
| Figura 5.-Potencia y caudal bombeado en un sistema fotovoltaico. Fuente: Webinario Enertik: Sistemas de bombeo solar [5].  | 19 |
| Figura 6.-Diagrama de flujo del proyecto. Fuente: propia.  | 20 |
| Figura 7-Valores del Coeficiente de cultivo de algunos cultivos. Fuente: adaptado de Allen et al. (1998).[6].  | 24 |
| Figura 8.-Esquema típico de un sistema fotovoltaico de bombeo. Adaptado de: Sistemas de bombeo fotovoltaico [2].   | 28 |
| Figura 9.- Fases de la metodología para el desarrollo del proyecto. Fuente: propia.  | 39 |
| Figura 10.- Etapas de la metodología del proyecto. Fuente: propia.   | 39 |
| Figura 11.-Municipios con área destinada al cultivo de cítricos en Santander. Adaptado de: Resultados de las evaluaciones agropecuarias municipales del año 2015 del producto cítricos [12]. | 41 |
| Figura 12.-Punto de funcionamiento en la curva de la bomba BARNES HE1.520-1 en el sistema Chocóa 17.   | 44 |
| Figura 13.-Diagrama de perdidas Sankey para Chocóa. Fuente: propia a partir de Software PVsyst   | 54 |
| Figura 14.-Esquema fotovoltaico a instalar. Adaptado de: Cambio Energético [14].   | 67 |
| Figura 15.- Inclinación del panel en Chocóa simulado en PVsyst. Fuente: propia   | 68 |

## RESUMEN

Con este proyecto se efectuó el dimensionamiento de bombeo de un sistema fotovoltaico, para suplir las necesidades de riego del cultivo de limón en las veredas de Girón, cumpliendo los requisitos establecidos por la Agencia de Desarrollo Rural (ADR), los cuales eran una hectárea sembrada y una altura total de bombeo de 40 m, con el fin de dar igualdad entre los beneficiarios. La ADR es la entidad responsable de gestionar, promover y financiar el desarrollo agropecuario y rural, quienes, mediante la Corporación Dignificando buscan canalizar recursos para apoyar, fomentar y volver más competitivo los cultivos de cítricos en Girón disminuyendo los costos de bombeo en una hectárea de cultivo mediante la incorporación de sistemas de bombeo fotovoltaico. La ADR Regional selecciono los sistemas de riego que se inscribieron, teniendo en cuenta requisitos legales de tierra, disponibilidad de agua y características del cultivo como su extensión y tipo de cultivo.

Se realizó el estudio en 8 lugares de las veredas Chocóa y Chocoita, los cuales contaban con información disponible sobre sus sistemas actuales de bombeo, y se realizó la búsqueda de los puntos de funcionamiento (caudales y alturas de bombeo) con las curvas características de las bombas que se están empleando. De igual forma, se determinó su costo para dicha labor. Los costos de bombeo se llevaron a una unidad de  $\$/m^3$  de agua bombeada y posteriormente, se determinó el costo energético en una hectárea regada. Seguidamente, se determinaron las necesidades netas de riego que demanda el cultivo de limón en una extinción de una hectárea en las 13 veredas de Girón.

El dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos de bombeo se realizó con 3 bombas solares: Bomba Grundfos 25 SQF-7 y las Bombas Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7 y PS2-1800 C-SJ5-12, para cubrir las necesidades netas de riego cumpliendo los requisitos de la ADR. Para el dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos con la misma altura geográfica y longitud de bombeo de los sistemas actuales, se realizó la búsqueda del punto de operación con las curvas de las bombas solares. En ambos casos, se determinó la eficiencia en el punto de funcionamiento, potencia pico de generador fotovoltaico a instalar, el número de paneles a instalar y el arreglo fotovoltaico que supla las necesidades del controlador de la bomba.

Se determinó la oportunidad de disminución del costo del  $m^3$  de agua bombeada por los sistemas fotovoltaicos, respecto a los sistemas actuales, encontrando que la bomba Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 es la mejor opción del sistema de 40 m de altura y la bomba Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7 es la que tuvo mejor rendimiento en los sistemas con las características actuales de bombeo. Los ahorros anuales tuvieron valores comprendidos entre \$ 98.115,05 y \$6.388.441,91 dependiendo de la línea base de suministro energético para bombeo que presentaba cada usuario.

Palabras Clave: riego, sistema fotovoltaico, bombeo, energía.

## ABSTRACT

With this project, the pumping dimensioning of a photovoltaic system was carried out, to meet the irrigation needs of the lemon crop in the villages of Girón, meeting the requirements established by the Rural Development Agency (ADR), which were a variety planted and a total pumping height of 40 m, in order to give equality among the beneficiaries. The ADR is the entity responsible for managing, promoting and financing agricultural and rural development, who, through the Dignificando Corporation, seek to channel resources to support, promote and make citrus crops in Girón more competitive, reducing pumping costs in an area of cultivation through the integration of photovoltaic pumping systems. The Regional ADR selects the irrigation systems that were registered, taking into account the legal requirements for land, water availability and characteristics of the crop such as its extension and type of crop.

The study was carried out in 8 places in the Chocoa and Chocoita villages, which had available information on their current pumping systems, and a search was made for the operating points (flow rates and pumping heights) with the characteristic curves of the pumps being used. Similarly, its cost for said work was determined. The pumping costs were brought to a unit of \$ / $m^3$  of pumped water and later, the energy cost was determined in one irrigated hectare. Subsequently, the net irrigation needs demanded by the cultivation of lemon in an extinction of one hectare in the 13 villages of Girón were determined.

The sizing of the photovoltaic pumping systems was carried out with 3 solar pumps: Grundfos 25 SQF-7 pump and Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7 and PS2-1800 C-SJ5-12 pumps, to cover the net irrigation needs meeting the ADR requirements. For the dimensioning of the photovoltaic systems with the same geographical height and pumping length of the current systems, the search for the point of operation was carried out with the curves of the solar pumps. In both cases, the efficiency at the operating point, peak power of the photovoltaic generator to be installed, the number of panels to be installed, and the photovoltaic arrangement that meets the needs of the pump controller were determined.

The opportunity to decrease the cost of the  $m^3$  of water pumped by the photovoltaic systems was determined, compared to current systems, finding that the Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 pump is the best option for the 40 m high system and the Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7 pump has the best performance in systems with current pumping characteristics. Monthly savings ranged from \$ 98.115,05 to \$6.388.441,91, depending on the baseline energy supply for pumping presented by each user.

Key Words: irrigation, photovoltaic system, pumping, energy.

## INTRODUCCIÓN

En Colombia la actividad agrícola forma parte de la base económica y productiva del país con, según el IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) y el Ideam (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), 7,6 millones de hectáreas que están siendo utilizadas por los diferentes tipos de actividades agropecuarias. Cerca del 90% de la superficie continental destinada a la agricultura es regada por medio de sistemas de riego, debido a la gran inversión del sector privado, que tiene de estos, un 61% desarrollado con este método.

Para la actividad agrícola, el país cuenta con muy buenas condiciones de suelo y climas variados que lo hacen un país con una producción de alimentos casi continúa a lo largo del año. Sin embargo, hay épocas del año en el que el verano y la escasez de lluvia hacen que la productividad de las siembras sea muy baja y con esto los precios de producción suban, teniendo consecuencias negativas tanto para el agricultor como para el consumidor final. Esto hace que existan desafíos que se deben tener en cuenta al momento de afrontar estas situaciones como son: hacer más eficiente el uso del agua al momento de su utilización para riego y buscar la manera de utilizar fuentes de energía sustentables y de bajo precio al momento de producir el bombeo de agua. Para combatir estos efectos, los sistemas de riego fotovoltaico, son una valiosa alternativa para mantener un cultivo con un suministro de agua constante durante todo el tiempo de siembra, convirtiéndose en potenciales aliados del desarrollo agrícola y rural del país.

Con el uso de la energía procedente del sol, se aprovecha esta fuente que se transforma en electricidad por medio de los paneles fotovoltaicos, haciéndola muy atractiva para ser una fuente limpia de potencia de los sistemas de bombeo. Esta tecnología tiene una muy buena acogida, debido a que en los meses en que más se necesita de riego, son los meses en que hay más abundancia de potencial solar, y por ende puede cubrir la demanda hídrica de los cultivos.

Al momento de dimensionar un sistema de bombeo tipo fotovoltaico se entra a tener en cuenta diferentes tipos de factores, que pueden tener gran impacto en la eficiencia del sistema al momento de su implementación: la demanda del cultivo, la ubicación, la confiabilidad de suministro de la fuente hídrica, el tipo de suministro que se va a realizar, etc.

Dentro de los principales productos que tienen una gran demanda de agua a lo largo de todo su ciclo productivo y en los que se ha intensificado los sistemas de riego tenemos: café, palma de aceite, aguacate, hortalizas, cítricos (mandarina, limón, naranja), melón, papaya, entre otros. Dentro de estos productos, el limón se ha tenido en cuenta, como un producto que ayuda a reactivar la economía en las zonas tropicales del país, debido a su gran demanda internacional por sus características en cuanto a color, jugo y corteza.

A lo largo de este documento, se desarrolla una metodología para el dimensionado de un sistema de bombeo fotovoltaico, partiendo de la determinación de las necesidades netas de riego del cultivo de limón in situ, para proceder a identificar las necesidades de bombeo, que se utilizan como insumo para determinar el punto de funcionamiento de la bomba solar.

Finalmente, se llega al cálculo del ahorro en el costo de bombeo para los usuarios, en función del costo del sistema utilizado en su línea base. Para poder determinar la disminución en el coste energético, se realizó la caracterización para determinar el punto en el que trabajan y su comparación con el sistema propuesto, teniendo como indicador de comparación el  $\$/m^3$  de agua bombeada.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Santander es el departamento con mayor número de hectáreas destinadas al cultivo de productos cítricos, con un área cosechada estimada de 19.784 hectáreas, siendo más del 22,86% del total a nivel nacional y el décimo en cuanto al rendimiento con 15,4 Ton/Ha [1]. En cuanto a exportación, Santander se ha establecido como el líder durante años. En 2017 este limón llegó a 21 países en los cuales tenemos a Estados Unidos con un 17,7%, Puerto Rico 15,3% y Países Bajos con 14,3%.

El proyecto está focalizado a disminuir la problemática asociada al costo energético debido al bombeo del cultivo en una extensión de una hectárea de cítrico sembrado de limón Lima Tahití y limón criollo, con la integración de un sistema fotovoltaico de bombeo en Girón. Se busca que este tipo de proyecto entregue una propuesta técnica, que responda a la necesidad de disminuir el costo de producción del producto por hectárea.

## 1 OBJETIVOS

### Objetivo General

Dimensionar un sistema fotovoltaico para riego, con el fin de disminuir los costos de energía en una hectárea de cultivo de cítricos en Girón, e integrarlo con los sistemas actuales de los usuarios.

### Objetivos Específicos

- Caracterizar los requerimientos y sistemas actuales de riego para los cultivadores de cítricos en Girón potencialmente beneficiarios del proyecto.
- Dimensionar el sistema de riego fotovoltaico, de acuerdo a los requerimientos que se definan, con el fin de integrarlo a los sistemas actuales para cubrir las necesidades hídricas del cultivo.
- Determinar la reducción de costos de energía por la implementación del sistema de riego solar, comparando con los costos de línea base.

## 2 MARCO TEORICO

### 2.1 Sistemas fotovoltaicos de bombeo

Un sistema fotovoltaico de bombeo es aquel en el que la energía que necesita el motor de la bomba para impulsar el agua, es suministrada por un arreglo fotovoltaico, que debe estar dimensionado a especificaciones del lugar y características del cultivo a regar. Su rango de aplicación de altura y caudal de bombeo comparado con 3 diferentes opciones de fuente de energía, (manual, eólico y diésel) se muestra en la figura 1:

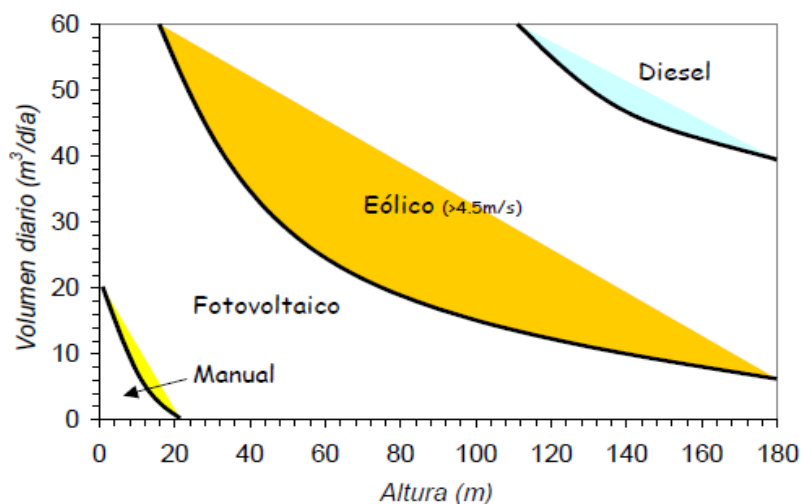


Figura 1.-Gráfico para selección de diferentes fuentes de energía para uso en bombeo.  
Fuente: Sistemas de Bombeo Fotovoltaico [2].

Existen varios tipos de bombas que dependiendo de la altura y caudal a bombear, dan distintas configuraciones para los sistemas de bombeo fotovoltaico [3]. A continuación se muestra en la figura 2, el rango de aplicación de 6 tipos de bombas para bombeo solar, lo que permite una buena selección de esta, a especificaciones del sistema que se requiere instalar.



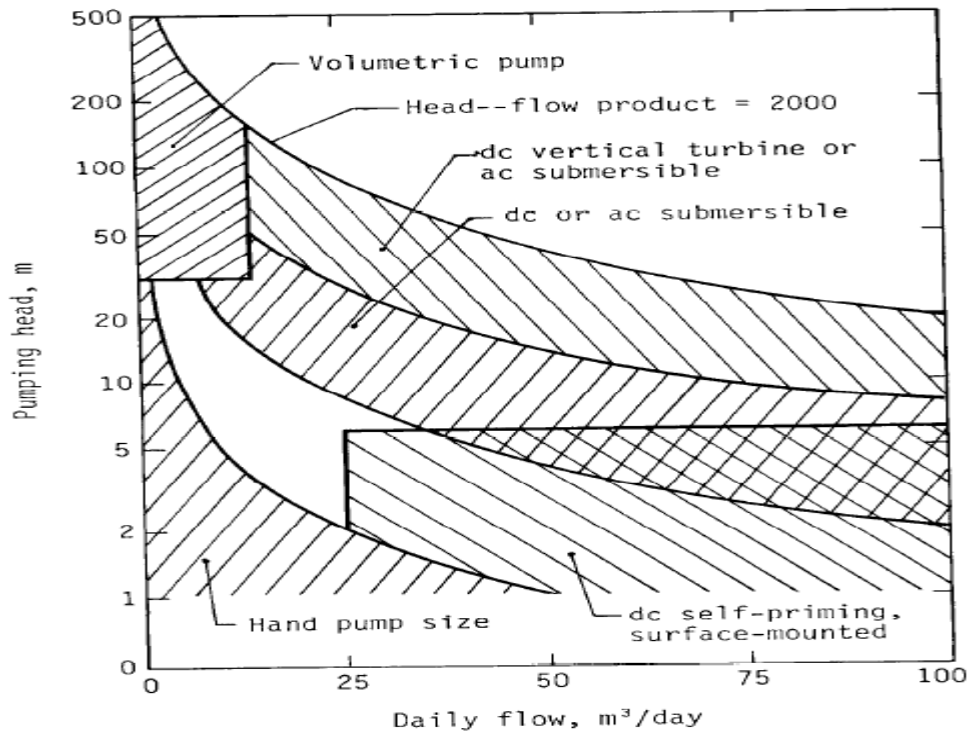


Figura 2.-Campo de aplicación de distintas bombas para sistemas fotovoltaicos de bombeo.  
Fuente: Water pumping: The Solar Alternative [3].

Existen dos diferentes tipos de sistemas de bombeo fotovoltaico:

### 2.1.1 Sistema fotovoltaico de bombeo conectado a Red

Un sistema fotovoltaico de bombeo conectado a red, es aquel sistema que toma la energía de la red eléctrica pública de la casa [4]. Se utiliza para generar la energía que consume la bomba al momento de estar funcionando. Estos sistemas son utilizados en zonas donde las horas solares pico (HSP) no garantizan la generación de energía demandada por el sistema de bombeo, por lo cual debe consumir de la red eléctrica de la vivienda, aunque también el sistema fotovoltaico puede suministrar al consumo de la casa cuando tenga excesos de energía. Este sistema necesita un inversor para transformar la corriente continua generada por los paneles en corriente alterna que consume la bomba y las cargas de la casa. El sistema fotovoltaico de bombeo conectado a la red está compuesto por los siguientes elementos que se describen a continuación:

Está conformado por paneles fotovoltaicos, inversor, medidor de consumo bidireccional y bomba convencional, los cuales se muestran en la figura 3.

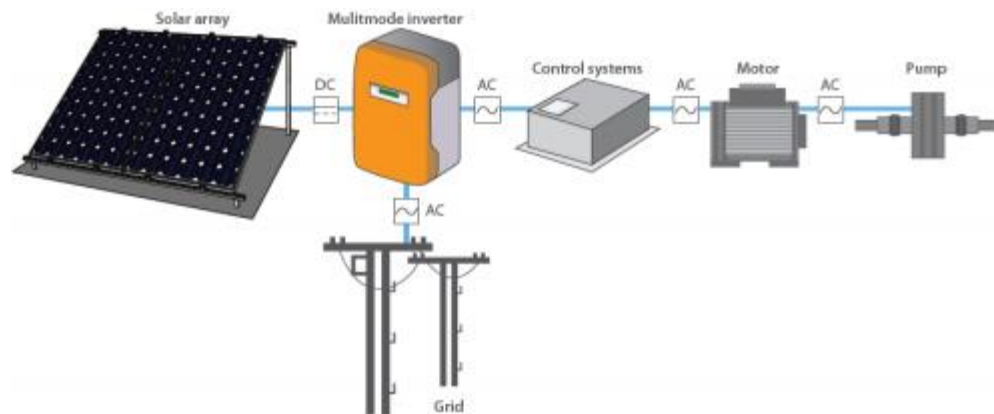


Figura 3-Componentes de un Sistema Fotovoltaico de Riego conectado a Red. Fuente: Manual de eficiencia energética en el sector de la fruta fresca en Chile [4].

### 2.1.2 Sistema fotovoltaico de bombeo aislado

En el bombeo fotovoltaico aislado, el sistema no está conectado a la red pública de energía y está destinado a satisfacer las necesidades del consumo propio de electricidad al accionar una bomba solar de riego que trabaja directamente energizada de los paneles fotovoltaicos [4]. El controlador que está entre los paneles y la bomba, mantiene al sistema de la bomba trabajando en su punto de máxima eficiencia variando la frecuencia eléctrica, y con ello las revoluciones por minuto y caudal bombeado, además controla el funcionamiento de la bomba cuando se necesite el bombeo.

Este sistema motor-bomba trabaja con corriente continua y no necesita acumulación a través de baterías ya que trabaja durante las horas solares pico. Los elementos que componen el sistema fotovoltaico de bombeo aislado son paneles fotovoltaicos, estructura de soporte, controlador y bomba solar, los cuales se muestran en la figura 4.

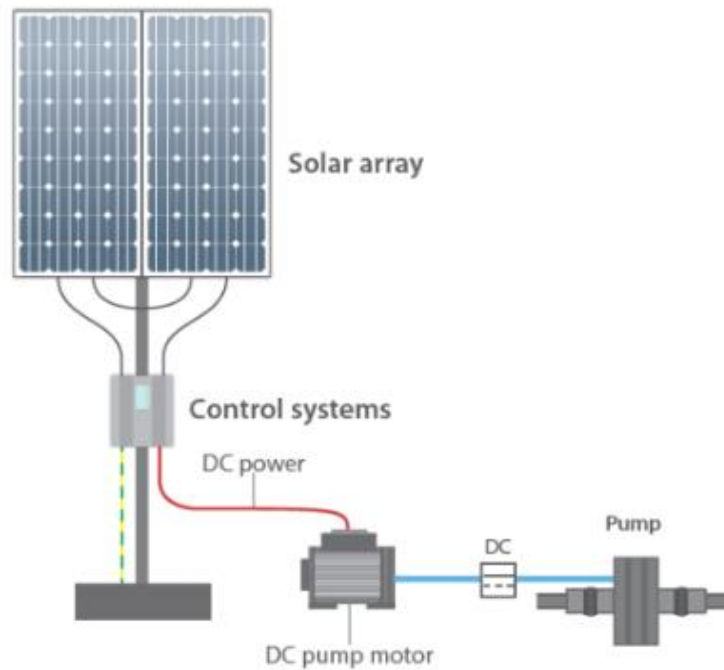


Figura 4-Componentes de Sistema Fotovoltaico de Riego aislado. Fuente: Manual de Eficiencia energética de la fruta fresca en Chile [4].

En un sistema fotovoltaico de bombeo, la energía demandada y el caudal bombeado por la bomba al día, es directamente proporcional debido a que en ambos casos depende de las horas solares picos en el lugar de la instalación. A continuación, en la figura 5, se puede observar la relación entre caudal máximo al día ( $C$ ), la energía eléctrica consumida por la bomba al día ( $E$ ) y las horas solares pico ( $HSP$ ) en un sistema fotovoltaico de bombeo.

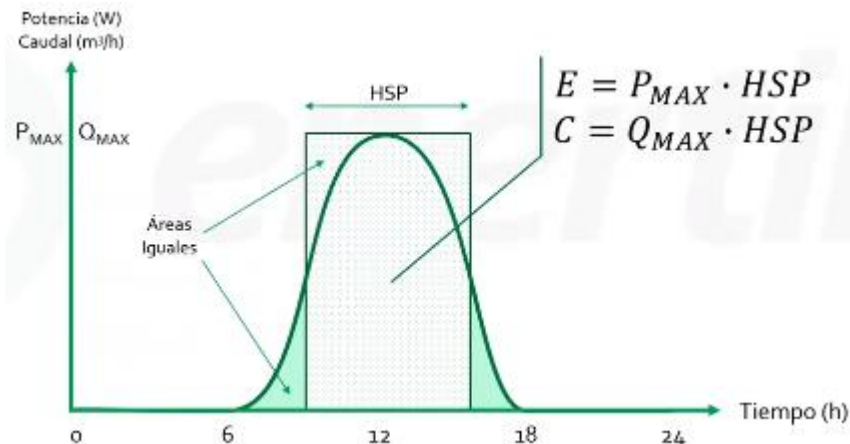


Figura 5.-Potencia y caudal bombeado en un sistema fotovoltaico. Fuente: Webinario Enertik: Sistemas de bombeo solar [5].

A continuación, en figura 6 se presenta el proceso para el desarrollo del dimensionado de un sistema de bombeo fotovoltaico aislado, partiendo de la determinación de las necesidades netas de riego. Los bloques en azul presentan los resultados a los que se busca llegar en cada etapa, y los blancos, los aspectos a considerar en su cálculo.

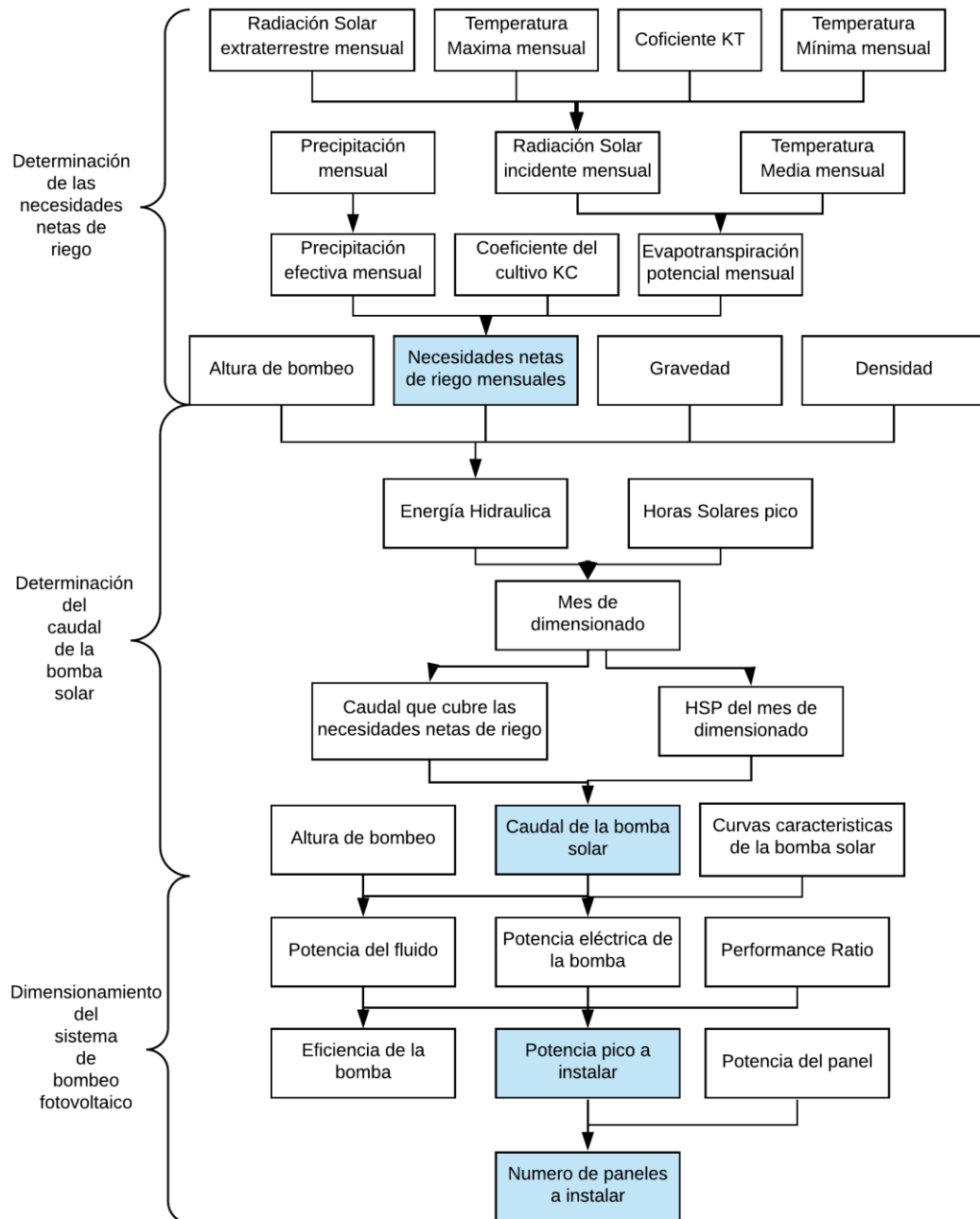


Figura 6.-Diagrama de flujo del proyecto. Fuente: propia

En los siguientes numerales se especifica la determinación de los pasos presentados en la figura 6.

## 2.2 Determinación de necesidades netas de riego

Al momento de hallar las necesidades de agua del cultivo, se debe tener en cuenta tanto aspectos hídricos de la zona como demanda del cultivo al mes y disponibilidad hídrica. Para ello es necesario determinar la evapotranspiración mensual a la que se va a ver sometido el cultivo, la precipitación de la zona y la precipitación efectiva que es aprovechada por el cultivo en cada mes del año. Con estos datos y el coeficiente del cultivo, se halla la necesidad neta de riego que debe ser suministrada por el sistema en cada mes del año, donde la precipitación no cubre de forma natural esta demanda hídrica.

Con la demanda hídrica se puede pasar al dimensionamiento del sistema fotovoltaico de bombeo que supla la necesidad energética que conlleva suplir el requerimiento hídrico del cultivo. Para calcular las necesidades hídricas del cultivo se debe tener en cuenta varios aspectos: las precipitaciones en la zona, temperatura, ubicación y radiación solar extraterrestre. Para hallar las necesidades netas del cultivo se debe estimar los siguientes aspectos.

- La evapotranspiración potencial
- El coeficiente de cultivo
- La precipitación

- **Radiación Solar Incidente**

En el proceso de determinación de evapotranspiración, la radiación solar incidente se evalúa a partir de la radiación solar extraterrestre  $R_0$  (radiación que llegaría al suelo si no existiera la atmósfera), se obtiene de tablas que están en función del mes, la latitud del lugar y el hemisferio en el que se encuentra. Para la obtención de la radiación solar incidente ( $R_s$ ) se propone la fórmula de Samani que es la siguiente [7]:

Ecuación 1.-Fórmula de Samani para Radiación solar incidente

$$R_s = R_0 * KT * (t_{max} - t_{min})^{0,5} \quad (1)$$

Dónde:

$R_s$  = radiación solar incidente, convertida en mm/día

$R_0$  = radiación solar extraterrestre, mm/día

$KT$  = Coeficiente dependiendo de la región en la que se encuentre el cultivo, adimensional

$t_{max}$  = temperatura máxima diaria, °C

$t_{min}$  = temperatura mínima diaria, °C

Para obtener la radiación solar extraterrestre ( $R_0$ ) existen varias tablas, que están en función del hemisferio, latitud y mes. Para su obtención se utilizó la tabla de  $R_0$  de Allen et al [7] (anexo 10). Normalmente las tablas de radiación extraterrestre se encuentran en MJulio/ $m^2$ /día, pero en este caso se presenta en mm/día teniendo en cuenta el siguiente factor de equivalencia:

$$1 \frac{mm}{dia} = 2,45 \frac{MJ}{m^2 * dia}$$

En cuanto al coeficiente  $KT$  de la ecuación de radiación solar incidente, es un dato empírico que se puede calcular a partir de la presión atmosférica del lugar. Hargreaves recomienda dos valores dependiendo del lugar en el que se vaya a hacer la evaluación: para regiones del interior recomienda un  $KT= 0,162$ , y para lugares ubicados en regiones costeras un  $KT= 0,19$  [7].

- **Evapotranspiración Potencial mensual**

La evapotranspiración es el conjunto de pérdidas de tipo físicas (evaporación) y biológicas (transpiración de las plantas) del suelo que se transforman en vapor de agua [6]. Este factor depende de factores de orden climático (radiación, viento, humedad del aire), referente a las plantas (cubierta vegetal) y características del suelo. Merece mencionarse la relación causa – efecto de los dos factores principales:

El clima: La evapotranspiración aumenta con tiempo cálido, seco, existencia de viento y cielos despejados.

El suelo: la evapotranspiración será mayor cuando hay mayor humedad del suelo.

La evapotranspiración potencial hace referencia a la cantidad máxima, teórica, de agua que puede cambiar de estado líquido a vapor, desde un suelo que está completamente cubierto de vegetación y es constantemente abastecido de agua [4]. Se usa como indicador de humedad o aridez climática. Dado que la mayor parte del agua evapotranspirada escapa hacia la atmosfera mediante los mencionados procesos, podemos decir que no se riega lo que necesita realmente las plantas. La evapotranspiración se expresa en mm (es decir, altura de la lámina de agua, como la precipitación y el contenido de agua en el suelo) por unidad de tiempo.

Uno de los métodos que son más utilizados para determinar las necesidades de agua son los métodos de Doorenbos y Pruitt y el método de Hargreaves y Samani [7], este último en el que solamente necesita datos de temperatura y radiación solar. La expresión general de la fórmula de Hargreaves es la siguiente:

Ecuación 2.-Fórmula de Hargreaves para Evapotranspiración potencial

$$ET_0 = 0,0135 * (t_{med} + 17,78) * R_s \quad (2)$$

Dónde:

$ET_0$  = evapotranspiración potencial diaria, mm/día

$t_{med}$  = temperatura media, °C

$R_s$  = radiación solar incidente, convertida en mm/día

- **Precipitación Efectiva mensual**

La precipitación total que cae en un área cultivada no es aprovechada de manera efectiva por las plantas debido a que no penetra en el suelo. Durante una lluvia determinada, solo una parte de esta cumple esta función debido a que existen pérdidas por escorrentía, evaporación y por percolación profunda. La precipitación efectiva es entonces la que se infiltra en el suelo, sin llegar a perderse por escorrentía o por filtración profunda, y permanece a disposición de las raíces de las plantas sin ahogarlas [6].

Para obtener el dato de la precipitación que es aprovechada por el cultivo, se proponen las ecuaciones utilizadas en el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USSCS) [6]. Estas ecuaciones se determinan a partir de una precipitación mensual mayor o menor de 250 mm y son las siguientes:

- Para una precipitación mensual menor de 250 mm:

Ecuación 3.-Formula Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USSCS) de Precipitación efectiva

$$P_{ef} = \frac{P_m}{125} * (125 - 0,2 * P_m) \quad (3)$$

- Para una precipitación mensual mayor o igual a 250 mm:

Ecuación 4.-Formula Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USSCS) de Precipitación efectiva

$$P_{ef} = (0,1 * P_m) + 125 \quad (4)$$

Dónde:

$P_{ef}$  = Precipitación efectiva, mm/mes

$P_m$ =Precipitación mensual, mm/mes.

- **Coefficiente de cultivo**

El coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) se utiliza para diferenciar la evapotranspiración de un cultivo de la evapotranspiración del pasto de referencia [6]. Es decir, en la ecuación anterior el término entre paréntesis ( $ET_0 * K_c$ ) hace referencia a la evapotranspiración del tipo de cultivo al que se quiera calcular. Para este trabajo se utilizó un valor de  $K_c$  para un cultivo de cítrico en un ambiente templado, entonces tomamos un  $K_c=0.68$  que esta entre el rango de clima húmedo (H) y seco (S), como se muestra en la figura 7:

| Valores de $K_c$ para fines de diseño.  |               |      |               |      |               |
|---|---------------|------|---------------|------|---------------|
| Grupo de cultivos   | $K_{c_{ini}}$ |      | $K_{c_{mod}}$ |      | $K_{c_{fin}}$ |
| Hortalizas pequeñas (crucíferas, apio, lechuga, zanahoria, espinaca, cebolla, rábano, etc.) | 0.70          |      | 1.05          |      | 0.95          |
| Solanáceas (tomate, chile, pimiento, berenjena)   | 0.60          |      | 1.15          |      | 0.80          |
| Cucurbitáceas (pepino, ayote, zapallo, pipián, melón, sandía)                               | 0.50          |      | 1.00          |      | 0.80          |
| Raíces y tubérculos (remolacha, yuca, papa, camote)   | 0.50          |      | 1.10          |      | 0.95          |
| Leguminosas (frijol, habichuela, cacahuate, haba, arveja, soya)                             | 0.40          |      | 1.15          |      | 0.55          |
| Hortalizas perennes (alcachofa, espárrago, fresa)   | 0.50          |      | 1.00          |      | 0.80          |
| Cultivos oleaginosos (ricino, colza, cártamo, ajonjolí, girasol)                            | 0.35          |      | 1.15          |      | 0.35          |
| Cereales (maíz, trigo, sorgo, arroz)  | 0.30          |      | 1.15          |      | 0.40          |
| <b>Pastos:</b>  | H*            | S*   | H             | S    |               |
| - Alfalfa   | 0.50          | 0.40 | 0.85          | 0.95 |               |
| - Leguminosas   | 0.55          | 0.55 | 1.00          | 1.05 |               |
| - Pasto para heno   | 0.60          | 0.55 | 0.80          | 0.90 |               |
| - Pasto bajo pastoreo   | 0.55          | 0.50 | 0.95          | 1.00 |               |
| Caña de azúcar  | 0.40          |      | 1.25          |      | 0.75          |
| Banano  | 0.50          |      | 1.10          |      | 1.00          |
| Piña  | 0.50          |      | 0.30          |      | 0.30          |
| Cítricos  |               |      | H             | S    |               |
|   |               |      | 0.65          | 0.75 |               |
| Frutales de hoja caduca   |               |      | H             | S    |               |
|   |               |      | 0.60          | 0.70 |               |
| Aguacate  |               |      | H             | S    |               |
|   |               |      | 0.50          | 0.55 |               |

(\*) H = clima húmedo; S = clima seco

Figura 7-Valores del Coeficiente de cultivo de algunos cultivos. Fuente: adaptado de Allen et al. (1998).[6].

- **Cálculo de Necesidades Netas de Riego mensuales**



Con los datos hallados de evapotranspiración, coeficiente del cultivo y precipitación efectiva se determina la demanda del cultivo en el lugar. La necesidad neta de riego es el agua que se debe suministrar por el sistema de riego para asegurar que el cultivo reciba toda el agua que necesita, teniendo en cuenta aspectos climáticos de la zona y el tipo de plantas sembradas. Para hallar la necesidad neta de riego, la ecuación utilizada formula lo siguiente [8]:

Ecuación 5.-Necesidades netas de riego

$$N_nR = (ET_0 * K_c) - P_{ef} \quad (5)$$

Dónde:

$N_nR$ = Necesidades netas de riego, mm/mes

$ET_0$ =Evapotranspiracion potencial, mm/mes

$K_c$ =Coeficiente de cultivo

$P_{ef}$ = Precipitación efectiva, mm/mes

Para pasar las necesidades netas de riego a  $m^3$ /(día\*hectárea) se tiene en cuenta la siguiente equivalencia [6]:

$$1 \frac{mm}{mes} = 1 \frac{L}{m^2 * mes}$$

Entonces la conversión para pasar hallar el caudal que cubre las necesidades netas de riego de una hectárea se formula de la siguiente manera:

$$1 \frac{m^3}{dia * hectarea} = 1 \frac{L}{m^2 * mes} * \frac{10000m^2}{1 hectarea} * \frac{1 m^3}{1000 L} * \frac{1 mes}{Numero de dias}$$

Este valor será el caudal diario  $Q_n$ , que debe suplir el sistema de bombeo para suplir la demanda hídrica de una hectárea de cultivo de limón en cada uno de los meses que necesite riego.

### 2.3 Determinación del caudal a bombear con el sistema fotovoltaico

Para el dimensionamiento del sistema de bombeo fotovoltaico se tiene que determinar el caudal nominal por hora con el que trabajara la bomba solar, con el fin de suplir las necesidades netas de riego diarias en una hectárea de limón. Con el fin de determinar el caudal es necesario seguir los siguientes pasos:

-Cálculo de la energía hidráulica con el caudal que cubre la necesidad neta de riego diaria en una hectárea del cultivo.

- Determinación del mes de dimensionado.
- Cálculo del caudal nominal por hora de la bomba, teniendo en cuenta las HSP y el Qn del mes de dimensionado.

- **Energía Hidráulica**

La energía hidráulica en los sistemas de riego es aquella que va contenida en el fluido bombeado que es transmitida por el rodete y a este por el motor. En el sistema se motor-bomba-fluido se dan las siguientes transformaciones de energía:

$$Energía_{electrica} \rightarrow Energía_{mecanica} \rightarrow Energía_{hidrica}$$

Se observa estos tipos de energía en las siguientes partes:

$$Motor \rightarrow Rodete \rightarrow Fluido$$

Para determinar la energía hidráulica que suministre las necesidades netas de riego diarias de cada mes y supla la altura manométrica de bombeo, se utilizó la siguiente formula [2]:

Ecuación 6.- Energía hidráulica

$$E_h = \rho * g * Qn * H_{total} \quad (6)$$

Dónde:

$E_h$ =Energía Hidráulica, J/día

$\rho$ =Densidad del agua,  $kg/m^3$

$g$ = Fuerza de gravedad,  $m/s^2$

$Qn$ = Caudal que demanda una hectárea de cultivo,  $m^3/día$

$H_{total}$ =Altura manométrica, m

Para tener la energía hidráulica en  $[kWh]$  se debe tener en cuenta la siguiente equivalencia:

$$1 kWh = 3600000 J$$

Entonces la ecuación de Energía hidráulica quedaría de la siguiente manera:

Ecuación 7.- Energía hidráulica 2

$$E_h = \rho * g * Qn * H_{total} * \frac{1 kWh}{3600 J} \quad (7)$$

Dónde:

$E_h$ =Energía Hidráulica, kWh/día  
 $\rho$ =Densidad del agua, kg/m<sup>3</sup>  
 $g$ = Fuerza de gravedad, m/s<sup>2</sup>  
 $Q_n$ = Caudal que demanda una hectárea de cultivo, m<sup>3</sup>/día  
 $H_{total}$ =Altura manométrica, m

- **Energía solar Disponible**

La energía solar disponible depende de la radiación solar incidente en el lugar donde se vayan a instalar el sistema fotovoltaico. Esta varía en cada lugar y de igual manera para cada día del año, cambio de estación, condiciones climáticas y geográficas. Las unidades serán las HSP con unidades en (h/día).

- **Determinación del mes de dimensionado (criterio del mes crítico).**

El criterio aplicable, al seleccionar el mes de dimensionado es el del mes crítico, es aquel en el que el coeficiente resultante de dividir la energía hidráulica diaria de cada mes entre la energía solar (HSP) es mayor [2] como se muestra en la Ecuación 8 (mayor valor en la columna derecha). Será, por consiguiente, el mes en que la relación entre energía requerida y recurso es mayor, es decir se tiene más limitada la energía para satisfacer la demanda hídrica del cultivo.

Ecuación 8.- Determinación del mes de dimensionado

$$\begin{pmatrix} \text{Enero} \\ \cdot \\ \vdots \\ \text{Diciembre} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{Eh_{\text{enero}}}{HSP_{\text{enero}}} \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{Eh_{\text{diciembre}}}{HSP_{\text{diciembre}}} \end{pmatrix} \quad (8)$$

- **Caudal de la bomba solar**

Una vez determinado del mes de dimensionado, se calcula el caudal nominal por hora al que debe trabajar la bomba solar ( $Q_b$ ), teniendo en cuenta el caudal que cubre las necesidades netas de riego ( $Q_n$ ) y las horas solares pico diarias (HSP) de este mes, que serán las horas que trabaje la bomba a su capacidad nominal:

Ecuación 9.- Caudal a bombear

$$Q_b = \frac{Q_n}{HSP} \quad (9)$$

Dónde:

$Q_b$ = Caudal de la bomba solar,  $m^3/h*Ha$

$Q_n$ =Caudal que cubre las necesidades netas de riego de una hectárea en el mes crítico,  $m^3/día*Ha$

$HSP$ =Horas solares pico en el mes crítico, h/día

## 2.4 Determinación de las pérdidas hidráulicas

Para la determinación de la altura total, que debe vencer un sistema de bombeo para suplir las necesidades de caudal, se debe tener en cuenta las pérdidas de altura sufridas por el agua que recorre el interior de la tubería. Con el fin de determinar la altura total de bombeo de los sistemas actuales y los sistemas fotovoltaicos de bombeo integrados a estos, se recomienda la siguiente ecuación [2]:

Ecuación 10.- Altura total de bombeo

$$H_{total} = H_g + H_d + H_k \quad (10)$$

Dónde:

$H_{total}$ = Altura total o manométrica, m

$H_g$ = Altura geométrica, m

$H_d$ = Altura debido a fricción o pérdidas mayores, m

$H_k$ = Altura debido a accesorios o pérdidas menores, m

En la figura 8, se observa la altura geométrica y la altura debido a las pérdidas en el sistema de conducción del agua en un sistema fotovoltaico de bombeo.

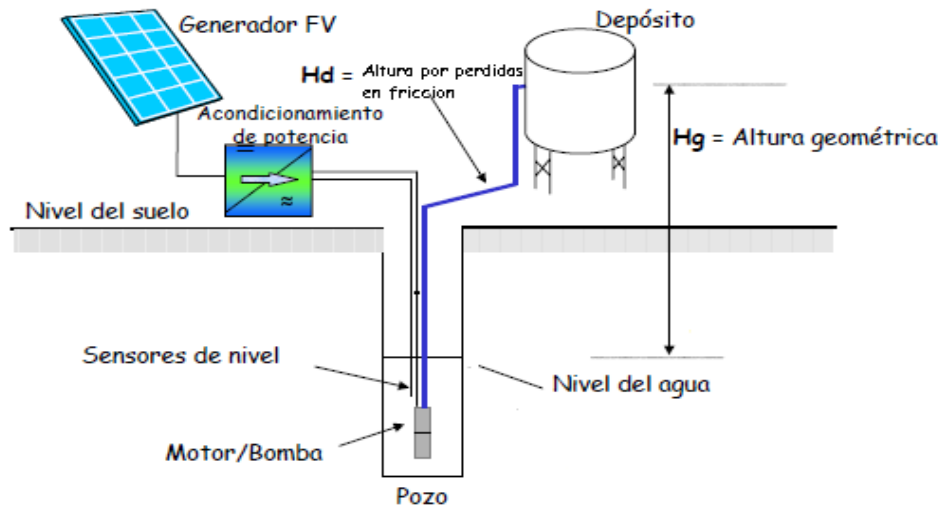


Figura 8.-Esquema típico de un sistema fotovoltaico de bombeo. Adaptado de: Sistemas de bombeo fotovoltaico [2].

Existen dos tipos de pérdidas en el trayecto que sigue el agua en la tubería: las pérdidas debido a la fricción interior de la tubería y las pérdidas debido a accesorios que están instalados en la tubería.

- **Altura Geométrica**

La altura geométrica es la distancia vertical desde la boca del pozo o sitio donde se extrae el agua, hasta el sitio más elevado al que se bombea [2]. Esta es la altura bruta debido a que no tiene en cuenta las pérdidas ocasionadas por la tubería.

- **Pérdidas de Fricción o mayores**

Las pérdidas de altura debido a la fricción son las que se ocasionan cuando la tubería no presenta una pared interna completamente lisa, ocasionando que el agua tenga más frenado con estas al momento de ser impulsada por su interior [2]. Para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 11.- Pérdidas de fricción o mayores

$$H_d = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g} \quad (11)$$

Dónde:

$H_d$ = Altura debido a fricción o pérdidas mayores, m

$f$ = Factor de fricción

$L$ =Longitud de la tubería, m

$D$ =Diametro interno de la tubería, m

$v$ = Velocidad del fluido bombeado, m/s

$g$ = Fuerza de gravedad, m/s<sup>2</sup>

- **Calculo del factor de fricción**

Para calcular el factor de fricción se parte de la ecuación de Darcy-Weisbach para despejar este valor.

Ecuación 12.- Ecuación de Darcy-Weisbach

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left( \frac{e}{3,7 * D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (12)$$

Se procede a despejar el  $f$  en un lado de la ecuación de la siguiente manera:

Ecuación 13.- Factor de fricción despejado de la ecuación de Darcy-Weisbach

$$f = \left( \frac{1}{-2 * \log \left( \frac{e}{3,7 * D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right)} \right)^2 \quad (13)$$

Dónde:

$f$ = Factor de fricción

$e$ =Coeficiente de Rugosidad Absoluta del material de la tubería, m

$D$ = Diámetro interno de la tubería, m

$Re$ = Numero de Reynolds, adimensional

Mediante proceso iterativo, se realiza la resta entre ambas partes de la ecuación, llevando esta resta a un valor de 0, mediante variación del valor del factor de fricción. El valor del factor de fricción que se utilizara para el análisis hidráulico de perdidas mayores, será aquel en el cual la resta de ambos términos de la ecuación sea más cercana a 0.

- **Calculo del Número de Reynolds**

El número de Reynolds es un valor adimensional que determina el tipo de régimen en el que está el fluido al momento de estar siendo bombeado, en este caso, en el interior de la tubería. Para su cálculo de utilizo la siguiente ecuación:

Ecuación 14.- Ecuación del número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho * D * v}{\mu} \quad (14)$$

Dónde:

$Re$ = Numero de Reynolds, adimensional

$\rho$ =Densidad del fluido,  $kg/m^3$

$D$ = Diámetro interno de la tubería, m

$v$ = Velocidad del fluido bombeado, m/s

$\mu$ =Viscosidad cinemática del fluido, Pa\*s

Con el factor de fricción encontrado se utilizan las curvas características de las bombas para hallar el caudal y altura al cual están trabajando los sistemas actuales. Para ello se hacen los siguientes pasos:

- Búsqueda de las curvas características de las bombas.
- Introducción de caudal.
- Proceso iterativo para determinar el factor de fricción y altura total de bombeo ( $H_{total}$ ).

- Determinar si el punto al caudal ( $Q_a$ ) y a la altura total hallada está en la curva de la bomba.

En el sistema fotovoltaico de bombeo no es necesario determinar el caudal mediante este proceso, debido a que el sistema debe suplir el que cubre las necesidades netas de riego ( $Q_b$ ).

## 2.5 Dimensionamiento del sistema de bombeo fotovoltaico

Para los sistemas fotovoltaicos se utiliza la misma teoría para el cálculo del factor de fricción, con el fin de calcular la altura total de bombeo en los sistemas integrados a los sistemas actuales ( $H_{total}$ ). En cuanto el caudal a trabajar, se emplea el que cubre las necesidades netas de riego por hora ( $Q_b$ ) con la bomba solar. Con estos dos datos, de altura total de bombeo y caudal, se procede a ser uso de la curva característica de la bomba, con el fin de hallar la potencia eléctrica ( $P_e$ ) que demanda la bomba solar para funcionar a esas condiciones de operación. Posteriormente, se determina la potencia pico del generador fotovoltaico, el número de paneles, las protecciones del sistema y el ángulo de inclinación que se ha de utilizar para su correcto funcionamiento.

- **Potencia del fluido en el sistema de bombeo fotovoltaico**

Es la potencia que se requiere para alcanzar el caudal deseado a la altura determinada al momento de bombear. La potencia del fluido [2] se halla de la siguiente manera:

Ecuación 15.- Potencia fluido

$$P_f = \rho * g * Q_b * H_{total} \quad (15)$$

Dónde:

$P_f$ =Potencia del fluido, W

$\rho$ =Densidad del agua,  $kg/m^3$

$g$ = Fuerza de gravedad,  $m/s^2$

$Q_b$ = Caudal bombeado,  $m^3/s$

$H_{total}$ =Altura manométrica, m

- **Eficiencia del sistema de bombeo fotovoltaico**

Para la eficiencia de la bomba solar se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 16.- Eficiencia bomba solar

$$\eta = \frac{P_f}{P_e} \quad (16)$$

Dónde:

$\eta$ = Eficiencia de la bomba, adimensional

$P_f$ =Potencia en el fluido, kW.

$P_e$ =Potencia eléctrica de la bomba, kW.

- **Potencia pico a instalar en el sistema de bombeo fotovoltaico**

Para hallar la potencia pico que se debe instalar en módulos fotovoltaicos con el fin de suplir la potencia eléctrica que demanda la bomba solar, se utiliza la siguiente ecuación [2]:

Ecuación 17.- Potencia pico sistema fotovoltaico

$$Pp = \frac{P_e}{Pr * \eta_c} \quad (17)$$

Dónde:

$Pp$ = Potencia pico requerida, kW

$P_e$ = Potencia Eléctrica de la bomba, kW

$Pr$ =Performance ratio del campo solar, adimensional

$\eta_c$ = Eficiencia del controlador, adimensional (propia del equipo a usar)

El performance ratio se determinó para cada vereda mediante el uso del software PVsyst.

- **Número de paneles en el sistema de bombeo fotovoltaico**

Para saber el número total de paneles a instalar, y la potencia del panel a utilizar, se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 18.- Numero de paneles

$$\text{Numero de paneles} = \frac{Pp}{Ppa} \quad (18)$$

Dónde:



$P_p$ = Potencia pico instalada, kW

$P_{pa}$ = Potencia panel (seleccionado a utilizar), kW

Para seleccionar la potencia y el número de paneles a instalar, se selecciona la potencia del panel en el que el valor del número de paneles se aproxime más a un número entero, para garantizar que se supla la potencia de la bomba y evitar el sobredimensionamiento.

- **Número de paneles en serie**

El cálculo de los paneles en serie se debe hacer teniendo las especificaciones del controlador de la bomba y del panel seleccionado, utilizando la siguiente ecuación

Ecuación 19.-Numero de paneles en serie

$$N_{serie} = \frac{V_{oc}}{V_{ocp}} \quad (19)$$

Dónde:

$N_{serie}$ =Número de paneles en serie

$V_{oc}$ =Voltaje de circuito abierto máximo a la entrada del controlador, V

$V_{ocp}$ =Voltaje de circuito abierto del panel, V

- **Número de paneles en paralelo**

El cálculo del arreglo de paneles en paralelo se realiza de la siguiente manera:

Ecuación 20.-Numero de paneles en paralelo

$$N_{paralelo} = \frac{\text{Numero de paneles}}{N_{serie}} \quad (20)$$

Dónde:

$N_{paralelo}$ =Número de paneles en paralelo

*Numero de paneles*=Numero total de paneles

$N_{serie}$ =Numero de paneles en serie

- **Capacidad de corriente de los conductores y corriente nominal de disparo de los dispositivos de protección**

La capacidad de corriente de los conductores para un sistema fotovoltaico se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 21.-Capacidad de corriente de los conductores

$$I_{cc} = I_{sc} * 125\% \quad (21)$$

Dónde:

$I_{cc}$ =Capacidad de corriente de los conductores, A

$I_{sc}$ =Corriente del arreglo fotovoltaico, A

La constante 125%, según la Norma Técnica Colombiana 2050 (Artículo 690-8), establece que la capacidad de corriente de los conductores y de disparo de los elementos de protección no debe ser menor a esta de la corriente de salida del arreglo fotovoltaico.

- **Capacidad de corriente corregida de los conductores**

La capacidad de corriente de los conductores teniendo en cuenta la temperatura ambiente y la temperatura nominal de estos, se determina de la siguiente manera:

Ecuación 22.- Capacidad de corriente corregida de los conductores

$$I_{CT} = I_{cc} * 91\% \quad (22)$$

Dónde:

$I_{CT}$ =Corriente corregida del conductor, A

$I_{cc}$ = Capacidad de corriente de los conductores, A

La constante de 91%, según la Norma Técnica Colombiana 2050 (Tabla 690-31), es el factor de corrección para cables de sistemas fotovoltaicos, a una temperatura ambiente entre 31-35 °C y una temperatura de conductores de 60 °C.

- **Angulo de inclinación del panel**

El ángulo en el que se debe instalar el panel para que tenga la mejor recepción de la radiación solar se halla de la siguiente manera:

Ecuación 23.-Angulo de inclinación

$$\beta_{opt} = 20^\circ - Lat \quad (23)$$

Dónde:

$\beta_{opt}$ =Angulo de inclinación de los paneles, °  
 $Lat$ = Latitud del lugar en que se va a instalar los paneles, °

## 2.6 Determinación del costo energético de los sistemas actuales

Para la determinación del costo energético de los sistemas actuales, se calcula el bombeo al mes y el costo del metro cubico de agua bombeado con el que se está trabajando actualmente.

- **Bombeo al mes por hectárea**

Para determinar el caudal que está suministrando la bomba en una hectárea de cultivo al mes, se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 24.- Bombeo al mes sistema actual

$$\text{Bombeo al mes} = \frac{\text{Horas de utilizacion} * \text{Dias de utilizacion} * Qa}{\text{Numero de hectareas regadas}} \quad (24)$$

Dónde:

*Bombeo al mes*,  $m^3/\text{mes} * \text{Ha}$

*Horas de utilización*, h/día

*Días de utilización*, día/mes

*Qa*: Caudal de trabajo de los sistemas actuales  $m^3/h$

La ecuación se divide por el número de hectáreas para determinar el caudal bombeado a una hectárea de cultivo.

- **Costo de bombeo por hectárea**

Para el cálculo del costo energético que se genera por los sistemas actuales de bombeo, se toma como indicador el  $\$/m^3$  de agua bombeada. Para la determinación de este valor se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 25.- Costo de bombeo

$$\text{Costo de bombeo} = \frac{\text{Precio de energia} * \text{Energia consumida}}{\text{Bombeo al mes}} \quad (25)$$

Dónde:

*Costo de bombeo*,  $\$/m^3$

*Precio de energía*,  $\$/kWh$

*Energía consumida, kWh/mes*  
*Bombeo al mes, m<sup>3</sup>/mes\*Ha*

El precio de la energía fue obtenido a través de la ADR, quienes contaban con los recibos eléctricos de los sistemas pilotos en las veredas de Chocóa y Chocóita en el 2019.

Para la energía consumida al mes por el sistema de bombeo, se tomaron datos de los recibos del servicio de energía en el año de 2019.

- **Costo energético mensual por hectárea**

Para determinar el costo mensual energético de los sistemas actuales de bombeo se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Costo energertico} = \text{Bombeo al mes} * \text{Costo de bombeo} \quad (26)$$

Dónde:

*Costo energético, \$/mes\*Ha*

*Bombeo mes, m<sup>3</sup>/mes\*Ha*

*Costo de bombeo, \$/m<sup>3</sup>*

### 3 ESTADO DEL ARTE

En Sistemas de Bombeo Fotovoltaico [2] se muestra una literatura para el dimensionamiento de un sistema de bombeo fotovoltaico en el que se toman en cuenta variables para obtener un dimensionamiento eficiente. Se caracterizan las partes en las que está compuesto un sistema de este tipo, las diferentes configuraciones que se pueden tener con los sistemas de bombeo tradicional utilizando como fuente energía fotovoltaica, entre ellos motores DC y AC, con sistema de acumulación en baterías y los que tienen convertidores de frecuencia. Para el dimensionamiento determina tanto las necesidades hídricas como la energía disponible en el sitio, y el posterior dimensionado del generador, motor, bomba y tuberías. Se trata de una literatura que se puede utilizar al momento de dimensionar un sistema fotovoltaico para cubrir una demanda de agua del cultivo, teniendo en cuenta las características del pozo y la zona en el que se ubica.

El Manual Práctico para el diseño de Sistemas de Miniriego [6], muestra una literatura para el dimensionamiento de las necesidades básicas del cultivo dependiendo de factores de ubicación, clima y propiedades del suelo. Para los cálculos de evapotranspiración del cultivo se utiliza el método detallado en Doorenbos y Pruitt en el cual solo se necesita de dos variables, la evapotranspiración de referencia y el coeficiente del tipo de cultivo, este último se detalla como poder obtenerlo si no se tiene un dato confiable y también da unos valores con fines de diseño. Para la precipitación se utiliza las ecuaciones utilizadas por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USSCS), estas ecuaciones se calculan a partir de la precipitación mensual, teniendo como referencia para el cálculo una precipitación mensual de 250 mm. Igualmente muestra el procedimiento para realizar los estudios topográficos del suelo y sus cálculos correspondientes. Por último detalla la forma de hacer un pre dimensionamiento calculando el área regable y el caudal continuo mínimo que se necesita para regar.

En la tesis Diseño de la red de distribución de un mini-distrito de riego para los corregimientos la palma y tres puertas, municipio de Restrepo (Valle del Cauca) [8], se muestra un diseño que se fundamenta en aspectos técnicos, sociales, ambientales y financiero para el diseño de una red de distribución de un mini-distrito de riego en los corregimientos de La Palma y Tres Puertas para cubrir la necesidad de la comunidad para desarrollar libremente sus actividades agrícolas. Se realizan diagnósticos generales de suelo, agua y clima, se determina la demanda hídrica de la región y se calcula la altura dinámica total requerida por el sistema, se desarrolla una simulación de la red, con esta se formula la propuesta y se estiman los costos del proyecto. Para la demanda hídrica se estima las necesidades netas de riego, la eficiencia del proyecto dependiendo del tipo de riego, en los que se estudiaron por aspersión y goteo, y el caudal de flujo continuo que se debe suministrar.

En el trabajo final de Master Grandes Sistemas Fotovoltaicos de Bombeo de Agua [9], se contempla el estudio del uso de la energía solar en sistemas de gran capacidad de bombeo de agua. Tiene como fundamento el uso de ecuaciones características de semejanza y de iso-eficiencia de bombas centrifugas, construyendo un modelo matemático de análisis y

comportamiento del conjunto motor-bomba, que permite relacionar el caudal con la potencia eléctrica en corriente alterna. El estudio se realiza para un bombeo fotovoltaico en una granja camaronera y comparándolo económicamente con un sistema de bombas impulsadas por motores de combustión interna.

En el artículo web Cálculo de la Evapotranspiración Potencial con la fórmula de Hargreaves [7], se muestra una literatura corta y de fácil entendimiento para el cálculo de la evapotranspiración y de cada uno de los términos que en dicha fórmula participan. Se muestra una la fórmula para poder calcular la radiación solar incidente y una formula simplificada de evapotranspiración sin tener en cuenta dicha radiación. A final del documento anexa una tabla de radiación solar extraterrestre en mm/día de Allen.

En el trabajo de grado, Desarrollo de una herramienta computacional para el dimensionamiento adecuado de sistemas fotovoltaicos de bombeo aplicados a riego [4], se propone una metodología y herramienta computacional en el software Engineering Equation Solver (EES), se realiza el diseño de una instalación fotovoltaica que supla las necesidades energéticas del sistema de bombeo de agua para el riego según las necesidades del cultivo en un punto de caudal y presión óptimos.

En Riego por goteo con energía solar para el tomate en Cavaco, Benguela, Angola [10], se dimensiona en el Valle de Cavaco provincia de Benguela en Angola, localizado en la latitud  $12^{\circ} 36' "$  S y la longitud  $13^{\circ} 53' "$  E con una altitud de 26 m sobre el nivel medio del mar, un sistema de riego solar fotovoltaico conformado por 6 paneles FV de la marca Kyocera con 54 Wp por unidad, una bomba centrífuga sumergible solar del modelo Lorentz de corriente directa a una altura de bombeo máxima de 30 m y un caudal de  $4 \text{ m}^3/\text{h}$  para el riego de tomate en una área experimental de 0,23 ha sobre un suelo arcilloso.

En Sistema fotovoltaico para el riego en la localidad de Praxedis [11], se trabajaron con cuatro pozos en la comunidad del Valle de Juárez, Praxedis G. Guerrero, donde se observa que para el año 2005 el bombeo agrícola cubre el 16 % del consumo de energía del municipio, con 1603 MWh. Incorporaron los datos de consumo con los datos de radiación en el software PVWATTS donde se identificó que es posible generar durante un año la cantidad de energía suficiente para reemplazar la energía convencional con la incorporación de energía fotovoltaico. Con base en los cálculos realizados, determinaron un arreglo con una potencia instalada de 12 kW en 5 cadenas en serie con 8 paneles de 310 watts y cada cadena conectada a un inversor de 2,5 KW, lográndose una disminución en el consumo de energía del 62,67 % en un área de  $298,49 \text{ m}^2$ .

De acuerdo con la revisión presentada, se evidencia que el uso de sistemas de bombeo fotovoltaico tiene un gran auge en el sector agrícola debido a su disponibilidad en las estaciones secas donde la demanda hídrica se incrementa y con ello los gastos energéticos. Además, los textos consultados proporcionaron una visión de cómo se determinan las necesidades netas de riego y se dimensionan los sistemas de bombeo solar.

## 4 METODOLOGIA

La metodología que se llevó a cabo para el desarrollo del proyecto consiste en 3 fases, las cuales fueron caracterización, análisis de datos y diseño, como se muestra a continuación en la figura 9:

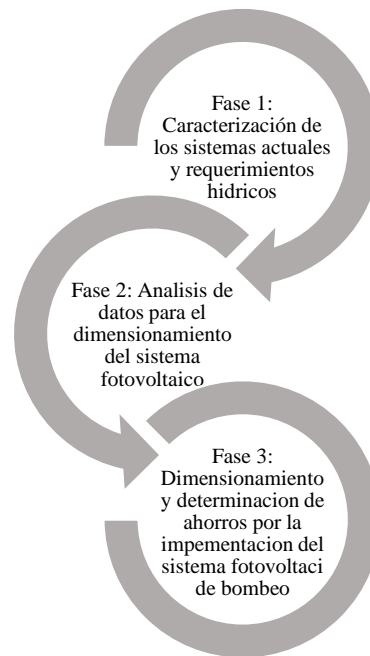


Figura 9.- Fases de la metodología para el desarrollo del proyecto. Fuente: propia.

Las principales etapas para desarrollar las fases de la metodología se muestran a continuación en la figura 10:

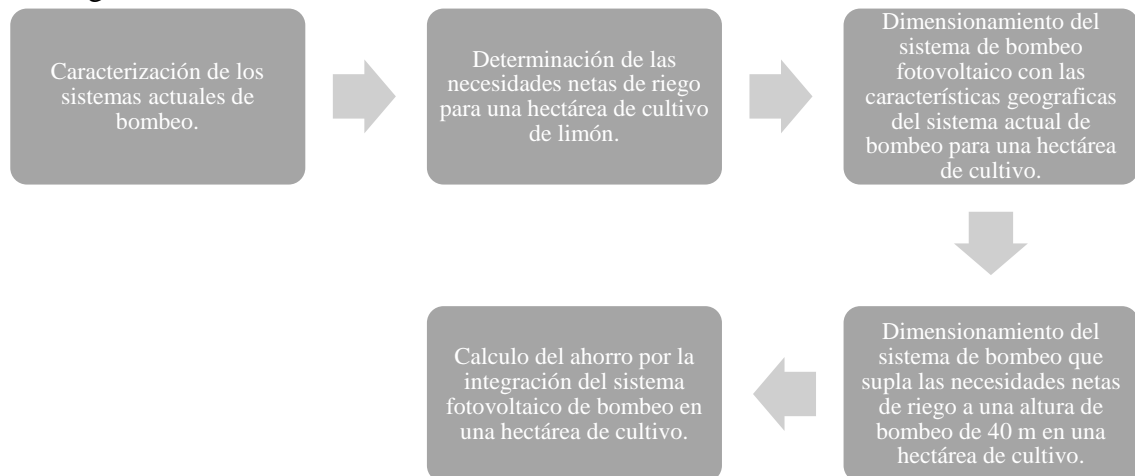


Figura 10.- Etapas de la metodología del proyecto. Fuente: propia.

La primera etapa es la caracterización de los sistemas actuales de bombeo, donde se busca conocer cómo opera la bomba: que potencia tiene, la altura geométrica de bombeo, número de hectáreas, la longitud de la tubería, las horas y días de uso y el consumo energético al mes. Esta caracterización fue suministrada por la ADR, ya que se contaba con dicha caracterización en 8 sistemas en las veredas Chocóa y Chocoita. Con estos datos se evalúa el punto de operación al que trabaja la bomba y el costo por esta labor en una hectárea de cultivo. Finalmente, se determina el costo del sistema de bombeo actual en una hectárea de cultivo de limón.

La siguiente etapa es la determinación de las necesidades netas de riego, donde se busca la demanda hídrica del cultivo de limón, en cada una de las veredas de Girón. Para su cálculo se busca el coeficiente de cultivo para fines de diseño y se obtienen los datos meteorológicos que están involucrados.

En la etapa, dimensionamiento del sistema fotovoltaico de bombeo con las características geográficas del sistema actual, se evalúa el rendimiento de las bombas solares como su eficiencia, potencia pico a instalar y el costo del metro cúbico de agua a la misma altura geométrica que los sistemas actuales. A continuación se realiza el dimensionamiento del sistema fotovoltaico de bombeo con un caudal que cubra la demanda hídrica en una hectárea de este producto y a una altura de bombeo de 40 m. De igual forma, se determina los costos de operación y mantenimiento de sistema de bombeo fotovoltaico. El sistema de bombeo fotovoltaico se diseñó hasta el punto de almacenamiento ya que el sistema de riego como tal, ya está diseñado en los sitios en que se va a instalar el equipo.

Por último, se determina el ahorro anual en los sistemas actuales por la integración del sistema de bombeo fotovoltaico.

Los municipios de Cepita y Barichara por falta de concesión de agua y recurso hídrico, respectivamente, no cumplieron con los requisitos y por ende no entran en el proyecto.



## 5 DESARROLLO

Girón, a nivel nacional, es el séptimo con mayor número de hectáreas sembradas destinadas al cultivo de cítricos con 1.952 hectáreas, y el tercero a nivel departamental. En cuanto a rendimiento, Girón se ubica en el puesto 16 a nivel nacional con 21,35 Ton/Ha [12]. En la figura 11 se observan, en escala de colores, los municipios con mayor número de hectáreas sembradas de cítricos en el departamento de Santander:

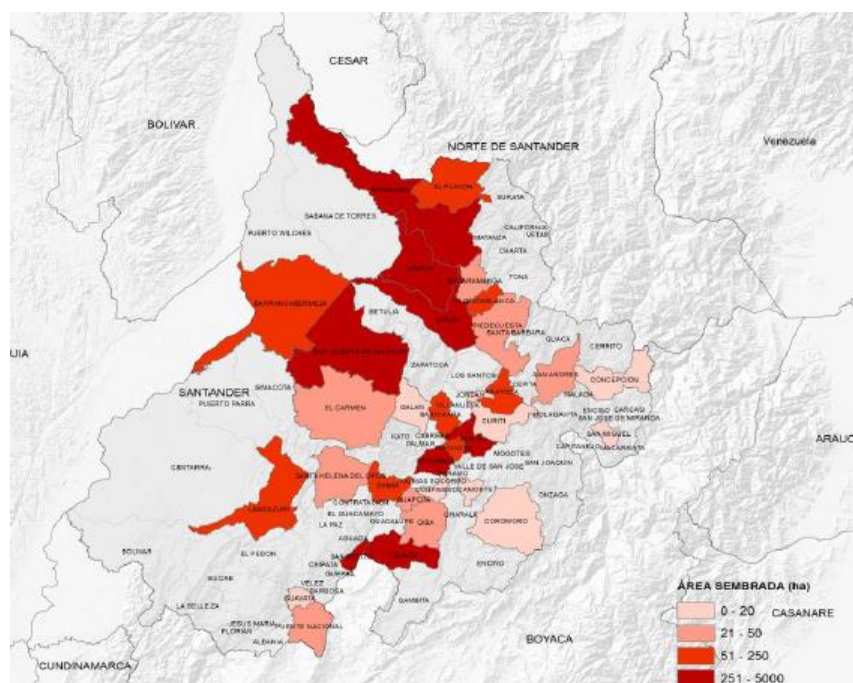


Figura 11.-Municipios con área destinada al cultivo de cítricos en Santander. Adaptado de: Resultados de las evaluaciones agropecuarias municipales del año 2015 del producto cítricos [12].

De acuerdo a la figura, el municipio de Girón es de los municipios con mayor número de hectáreas sembradas de cítricos. El territorio del municipio de San Juan de Girón cuenta con un total de 42.688,31 hectáreas de extensión, con una temperatura promedio de 28 °C. El municipio está conformado por 20 veredas, las cuales son: Carrizal, Río Frio, Llanadas, Barbosa, Acapulco, Ruitoque, Palogordo, Chocóa, Cantalta, Pantano, Motoso, La Parroquia, El Cedro, Sogamoso, Marta, Bocas, Lagunetas, Llano Grande, Peñas y Chocoita. El municipio tiene un área sembrada para fines de agricultura de 11.674 hectáreas, en las cuales se cultivan los siguientes productos: piña, tabaco, cítricos, maracuyá, tomate y cacao [13].

El proyecto se enfoca a cubrir la demanda hídrica y disminuir los costos debido al bombeo de agua en una hectárea de limón. Los beneficiarios se ubican en 13 veredas del municipio de Girón, como se muestra a continuación en la tabla 1:

Tabla 1.-Número de beneficiarios por vereda en Girón. Fuente: propia

| Vereda       | Número de beneficiarios |
|--------------|-------------------------|
| Chocoa       | 17                      |
| Palogordo    | 19                      |
| Chocoita     | 18                      |
| Cedro        | 1                       |
| Lagunetas    | 3                       |
| Marta        | 3                       |
| Motoso       | 3                       |
| Rio Frio     | 1                       |
| Peñas        | 6                       |
| Ruitoque     | 8                       |
| Barbosa      | 1                       |
| Cantalta     | 14                      |
| Llano Grande | 10                      |
| <b>Total</b> | <b>104</b>              |

Con este proyecto se cubre el 5,32% del área sembrada de cítricos a nivel municipal, lo que conllevará a volver más competitivo y aumentar la producción en estas 104 hectáreas sembradas.

### 5.1 Caracterización de los sistemas de bombeo actuales

Para la caracterización de los sistemas de bombeo actuales, se obtuvieron los datos del lugar y de uso de la bomba de 8 sistemas ubicados en las veredas Chocoa y Chocoita. Estos datos fueron suministrados por la ADR, para caracterizar el funcionamiento y costo de los sistemas actuales de bombeo. A continuación se presenta como ejemplo de caracterización, el sistema Chocoa 17, y posterior a esto, los resultados en los 8 sistemas actuales de las veredas Chocoa y Chocoita.

Los datos obtenidos del sistema Choca 17 son los presentados a continuación en la tabla 2:

Tabla 2.-Datos del sistema Chocoa 17. Fuente: propia.

| Datos Lugar           |      |
|-----------------------|------|
| Cantidad de Bombas    | 1    |
| Potencia bomba (HP)   | 2    |
| Altura geométrica (m) | 19   |
| Caudal (GPM)          | 48,5 |
| Longitud tubería (m)  | 45,3 |

|                                 |                  |
|---------------------------------|------------------|
| <b>Horas al día</b>             | 24               |
| <b>Días al mes</b>              | 28               |
| <b>Consumo al mes (kWh/mes)</b> | 1002,62          |
| <b>Hectáreas</b>                | 6                |
| <b>Serie bomba</b>              | BARNES HE1.520-1 |

Para caracterizar el funcionamiento actual de la unidad de bombeo en el sistema Chocó 17, es necesario la búsqueda de la ficha técnica de la bomba Barnes HE 1.5 20-1. La ficha técnica de la bomba se encuentra en el anexo 6.

En la ficha técnica de la bomba se busca el punto de funcionamiento con el caudal y la altura total de bombeo. Por este motivo, se debe determinar las pérdidas de altura debido a la fricción del agua con las paredes internas de la tubería.

Para el análisis de pérdidas hidráulicas mayores, debido a la fricción del agua con la tubería, se utilizan las ecuaciones para la determinación de las pérdidas hidráulicas (ec. 10-14), siguiendo los siguientes pasos:

-Se introduce el caudal.

-Se itera el factor de fricción para hallar la altura correspondiente a las pérdidas mayores. Seguidamente, se determina la altura total de bombeo.

-Se verifica en la curva de la bomba que a dicho caudal ( $Q_a$ ) se bombea la altura total hallada ( $H_{total}$ ).

Los datos generales que se utilizaron para determinar las pérdidas y hallar el punto de funcionamiento de sistemas actuales de bombeo, se muestran en la tabla 3:

Tabla 3.-Datos generales sistema actual. Fuente: propia.

| Datos generales   |           |                   |
|---|-----------|-------------------|
| <b>Gravedad</b>   | 9,81      | m/s <sup>2</sup>  |
| <b>Densidad del agua</b>  | 1000      | kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Viscosidad Dinámica del agua</b>                                 | 0,001     | Pa.s              |
| <b>Coefficiente de rugosidad absoluta PVC <math>\epsilon</math></b> | 0,0000015 | m                 |

La tabla 4 muestra los resultados del análisis hidráulico de pérdidas del sistema Chocó 17, con el punto de operación del sistema actual (altura total de bombeo y caudal), y la figura 12 muestra el punto de funcionamiento en la curva característica de la bomba:

Tabla 4.-Punto de operación del sistema actual Chocoa 17. Fuente: propia.

| Sistema Actual                 |            |         |
|--------------------------------|------------|---------|
| <b>Altura geométrica</b>       | 19         | m       |
| <b>Caudal</b>                  | 0,00367    | $m^3/s$ |
| <b>Longitud tubería</b>        | 45,3       | m       |
| <b>Potencia mecánica</b>       | 1.492      | W       |
| <b>Diámetro impulsión</b>      | 0,0381     | m       |
| <b>Diámetro aspiración</b>     | 0,0381     | m       |
| <b>Factor de Fricción</b>      | 0,0182156  | -       |
| <b>Altura total</b>            | 30,46      | m       |
| <b>Altura pérdidas mayores</b> | 11,46      | m       |
| <b>Número de Reynolds</b>      | 122.804,05 | -       |

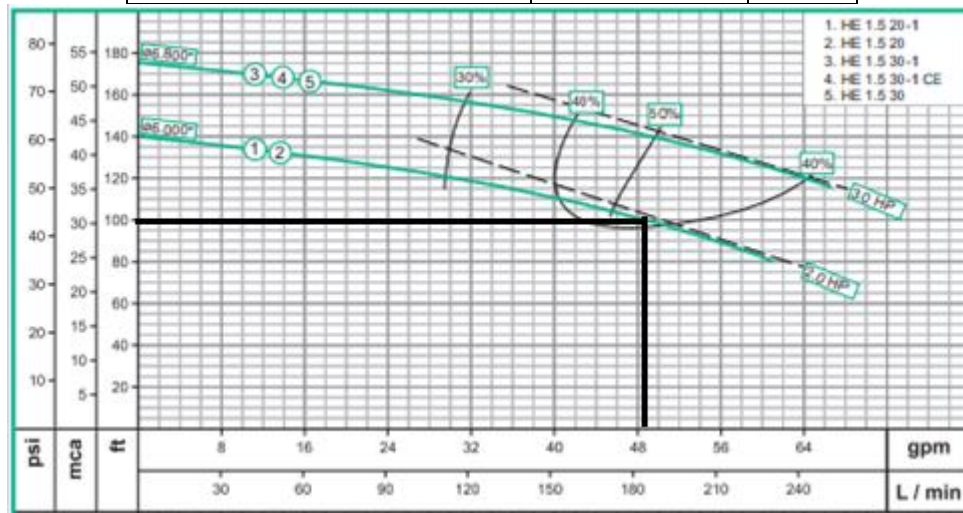


Figura 12.-Punto de funcionamiento en la curva de la bomba BARNES HE1.520-1 en el sistema Chocoa 17

Con el punto de funcionamiento del sistema actual de bombeo, se procede a hallar el bombeo a mes utilizando la ecuación 24. Para el sistema Chocoa 17 se encontró el caudal al mes, mostrado en la tabla 5:

Tabla 5.-Bombeo al mes del sistema actual Chocoa 17. Fuente: propia.

| Bombeo               |          |              |
|----------------------|----------|--------------|
| <b>Bombeo al mes</b> | 1.481,66 | $m^3/mes*Ha$ |
| <b>Horas al día</b>  | 24       | h/día        |
| <b>Días al mes</b>   | 28       | días/mes     |

A continuación, en la tabla 6, se muestra el punto de funcionamiento (altura total de bombeo y caudal total) los sistemas actuales en las veredas de Chocóa y Chocoita.

Tabla 6.-Punto de funcionamiento de los sistemas actuales. Fuente: propia.

| Vereda   | Lugar              | Bomba Actual        | Altura geométrica [m] | Longitud de bombeo [m] | Punto de funcionamiento |                    |
|----------|--------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|--------------------|
|          |                    |                     |                       |                        | Altura total [m]        | Caudal [ $m^3/h$ ] |
| Chocóa   | <b>Chocóa 7</b>    | BARNE S HE 1.5 20-1 | 4                     | 122                    | 32,06                   | 12,55              |
|          | <b>Chocóa 10</b>   | IHM 1.1/2A-1MW      | 10                    | 301                    | 21,55                   | 10,23              |
|          | <b>Chocóa 14</b>   | IHM 1.1/2A-1.5MW    | 12                    | 385                    | 23,44                   | 9                  |
|          | <b>Chocóa 17</b>   | BARNE S HE1.520 -1  | 19                    | 45,3                   | 30,47                   | 13,23              |
| Chocoita | <b>Chocoita 1</b>  | BARNE S HE 1.5 30-1 | 10                    | 132                    | 42,48                   | 13,5               |
|          | <b>Chocoita 10</b> | IHM 1.1/2A-1MW      | 16                    | 282                    | 24,72                   | 8,86               |
|          | <b>Chocoita 13</b> | IHM 1.1/2A-1W       | 16                    | 50                     | 18,42                   | 11,59              |
|          | <b>Chocoita 19</b> | IHM 1.1/2A-1.5MW    | 37                    | 280                    | 37,51                   | 1,36               |

De acuerdo al caudal bombeado por hora de los sistemas actuales de bombeo, se determina el caudal bombeado al día en una hectárea a partir de las hectáreas que son regadas y las horas de uso del sistema. Los valores de caudal diarios y caudal mensual, utilizando la ecuación 24, de cada sistema se presentan a continuación en la tabla 7.

Tabla 7.-Caudal bombeado al día y al mes en los sistemas actuales de Chocóa y Chocóita.  
Fuente: propia.

| Vereda   | Lugar       | Hectáreas regadas [Ha] | Horas de uso [h/día] | Días de uso [día/mes] | Caudal [ $m^3$ /día*Ha] | Caudal [ $m^3$ /mes*Ha] |
|----------|-------------|------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| Chocóa   | Chocóa 7    | 10                     | 5                    | 28                    | 6,27                    | 175,66                  |
|          | Chocóa 10   | 9                      | 4                    | 12                    | 4,55                    | 54,55                   |
|          | Chocóa 14   | 14                     | 12                   | 28                    | 7,72                    | 216,03                  |
|          | Chocóa 17   | 6                      | 24                   | 28                    | 52,92                   | 1.481,66                |
| Chocóita | Chocóita 1  | 1,5                    | 12                   | 28                    | 108,01                  | 3.024,42                |
|          | Chocóita 10 | 10                     | 12                   | 22                    | 10,64                   | 145,38                  |
|          | Chocóita 13 | 3,9                    | 24                   | 24                    | 71,34                   | 1.712,22                |
|          | Chocóita 19 | 1,6                    | 2                    | 28                    | 1,70                    | 47,73                   |

## 5.2 Determinación de necesidades netas de riego

Para la selección de la base de datos a utilizar, en la toma de data para la determinación de las necesidades netas de riego, se realizó la consulta de precipitación mensual en dos bases de datos: IDEAM y NASA. Se observó, que la base de datos del Ideam solo ofrece data de tres estaciones meteorológicas en el municipio de Girón, en cambio, la base de datos de la NASA, me brinda información de cada punto geográfico que se le solicite.

Para la determinación de las necesidades hídricas del cultivo se seleccionó la base de datos de la NASA, debido a que me brinda datos actualizados de cada una de las veredas de Girón en la que se implementara el proyecto. Seleccionada la base de datos a utilizar, se procedió a extraer los siguientes datos diarios para el año 2019 en las 13 veredas de Girón: Precipitación (mm/día), Temperatura Máxima y Mínima ( $^{\circ}C$ ) y la radiación solar Incidente sobre superficie horizontal ( $kWh/m^2/día$ ).

Los datos presentados en la tabla 8 corresponden a los datos mensuales obtenidos en la vereda Chocóa por medio de la base de datos de la NASA.

Tabla 8.-Datos meteorológicos mensuales de Chocoa. Fuente: propia.

| Latitud | Longitud  | Año  | Mes | Precipitación [mm/mes] | T. Max [°C] | T. Min [°C] | Radiación [kWh/m <sup>2</sup> /día] |
|---------|-----------|------|-----|------------------------|-------------|-------------|-------------------------------------|
| 6.95551 | -73.16589 | 2019 | 1   | 78,54                  | 27,48       | 13,69       | 5,13                                |
|         |           |      | 2   | 5,89                   | 28,19       | 13,58       | 5,68                                |
|         |           |      | 3   | 201,56                 | 29,78       | 14,74       | 5,09                                |
|         |           |      | 4   | 212,82                 | 25,95       | 14,42       | 4,82                                |
|         |           |      | 5   | 201,5                  | 25,94       | 16,15       | 4,94                                |
|         |           |      | 6   | 65,49                  | 26,54       | 14,64       | 4,82                                |
|         |           |      | 7   | 133,23                 | 26,94       | 14,6        | 5,18                                |
|         |           |      | 8   | 95,2                   | 27,75       | 13,56       | 5,57                                |
|         |           |      | 9   | 145,72                 | 28          | 15,42       | 5,41                                |
|         |           |      | 10  | 254,96                 | 26,18       | 15,96       | 5,27                                |
|         |           |      | 11  | 142,95                 | 25,52       | 15,19       | 4,81                                |
|         |           |      | 12  | 16,56                  | 27,47       | 12,93       | 5,47                                |

Con los datos presentados en la tabla 8, se procede a realizar la determinación de las necesidades netas de riego. En primer lugar se calcula la radiación solar incidente con los datos de radiación solar extraterrestre del lugar en la tabla de Allen et al y un coeficiente  $k_t$  de 0,162 por ser una región no costera [7] con la ecuación 1. Los valores de radiación solar incidente se presentan en la tabla 9 para la vereda Chocoa.

Tabla 9.-Radiación Solar incidente en Chocoa. Fuente: propia.

| Mes               | T. max. [°C] | T. min [°C] | Ro [mm/día] | Rs [mm/día] |
|-------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Enero</b>      | 27,48        | 13,69       | 13,9        | 8,36        |
| <b>Febrero</b>    | 28,19        | 13,58       | 14,8        | 9,16        |
| <b>Marzo</b>      | 29,78        | 14,74       | 15,4        | 9,67        |
| <b>Abril</b>      | 25,95        | 14,42       | 15,4        | 8,47        |
| <b>Mayo</b>       | 25,94        | 16,15       | 15,1        | 7,65        |
| <b>Junio</b>      | 26,54        | 14,64       | 14,7        | 8,21        |
| <b>Julio</b>      | 26,94        | 14,6        | 14,9        | 8,47        |
| <b>Agosto</b>     | 27,75        | 13,56       | 15,2        | 9,27        |
| <b>Septiembre</b> | 28           | 15,42       | 15,3        | 8,79        |
| <b>Octubre</b>    | 26,18        | 15,96       | 15          | 7,76        |
| <b>Noviembre</b>  | 25,52        | 15,19       | 14,2        | 7,39        |
| <b>Diciembre</b>  | 27,47        | 12,93       | 13,7        | 8,46        |

Con la determinación de la radiación solar incidente, se estima la evapotranspiración potencial que se presenta en la vereda Chocoa en cada mes del año utilizando la ecuación 2, calculando en primer lugar, el promedio entre la temperatura máxima y mínima. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 10.

Tabla 10.-Evapotranspiración Potencial en Chocóa. Fuente: propia.

| Mes               | T.prom<br>[°C] | Rs<br>[mm/día] | Eto<br>[mm/día] | Eto<br>[mm/mes] |
|-------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| <b>Enero</b>      | 20,58          | 8,36           | 4,33            | 134,25          |
| <b>Febrero</b>    | 20,88          | 9,16           | 4,78            | 133,94          |
| <b>Marzo</b>      | 22,26          | 9,67           | 5,23            | 162,12          |
| <b>Abril</b>      | 20,18          | 8,47           | 4,34            | 130,25          |
| <b>Mayo</b>       | 21,04          | 7,65           | 4,01            | 124,36          |
| <b>Junio</b>      | 20,59          | 8,21           | 4,25            | 127,65          |
| <b>Julio</b>      | 20,77          | 8,47           | 4,41            | 136,79          |
| <b>Agosto</b>     | 20,65          | 9,27           | 4,81            | 149,20          |
| <b>Septiembre</b> | 21,71          | 8,79           | 4,68            | 140,60          |
| <b>Octubre</b>    | 21,07          | 7,768          | 4,07            | 126,30          |
| <b>Noviembre</b>  | 20,35          | 7,39           | 3,80            | 114,19          |
| <b>Diciembre</b>  | 20,2           | 8,46           | 4,33            | 134,51          |

De igual forma, se procede a determinar la precipitación efectiva que es aprovechada por las plantas en la vereda Chocóa, dependiendo de la precipitación total al mes con las ecuaciones 3 y 4; teniendo como resultado los valores presentados en la tabla 11 en cada mes del año:

Tabla 11.-Precipitación Efectiva en Chocóa. Fuente: propia.

| Mes               | Precipitación<br>Total<br>[mm/mes] | Precipitación<br>Efectiva<br>[mm/mes] |
|-------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Enero</b>      | 78,54                              | 68,67                                 |
| <b>Febrero</b>    | 5,89                               | 5,83                                  |
| <b>Marzo</b>      | 201,56                             | 136,55                                |
| <b>Abril</b>      | 212,82                             | 140,35                                |
| <b>Mayo</b>       | 201,5                              | 136,53                                |
| <b>Junio</b>      | 65,49                              | 58,62                                 |
| <b>Julio</b>      | 133,23                             | 104,82                                |
| <b>Agosto</b>     | 95,2                               | 80,69                                 |
| <b>Septiembre</b> | 145,72                             | 111,74                                |
| <b>Octubre</b>    | 254,96                             | 150,49                                |
| <b>Noviembre</b>  | 142,95                             | 110,25                                |
| <b>Diciembre</b>  | 16,56                              | 16,12                                 |

Con los datos mensuales de evapotranspiración potencial, precipitación efectiva y el coeficiente del cultivo (0,68), se determinan las necesidades netas de riego que demanda el limón en la vereda Chocóa con la ecuación 5. A continuación se observan las necesidades netas de riego mensuales en la tabla 12.



Tabla 12.-Necesidades Netas de Riego en Chocoa. Fuente: propia.

| Necesidades Netas de Riego |          |                          |
|----------------------------|----------|--------------------------|
| Mes                        | [mm/mes] | [m <sup>3</sup> /día*Ha] |
| <b>Enero</b>               | 22,62    | 7,29                     |
| <b>Febrero</b>             | 85,24    | 30,44                    |
| <b>Marzo</b>               | 0        | 0                        |
| <b>Abril</b>               | 0        | 0                        |
| <b>Mayo</b>                | 0        | 0                        |
| <b>Junio</b>               | 28,18    | 9,39                     |
| <b>Julio</b>               | 0        | 0                        |
| <b>Agosto</b>              | 20,75    | 6,69                     |
| <b>Septiembre</b>          | 0        | 0                        |
| <b>Octubre</b>             | 0        | 0                        |
| <b>Noviembre</b>           | 0        | 0                        |
| <b>Diciembre</b>           | 75,34    | 24,30                    |

Los datos que aparecen en 0 son meses donde la precipitación efectiva cubre de forma natural las necesidades de riego, por lo tanto, no presentan ninguna necesidad de bombeo.

### 5.2.1 Determinación del caudal a bombear en el sistema fotovoltaico

Una vez se tiene la necesidad hídrica que necesita el cultivo en una extensión de una hectárea y la altura de bombeo de 40 m, se procede a determinar el caudal a bombear del sistema fotovoltaico. En primer lugar, se obtiene la energía hidráulica que supla la demanda hídrica del cultivo con la ecuación 7, obteniendo los valores de la tabla 13 para la vereda Chocoa en los meses que demandan riego.

Tabla 13.-Energía Hidráulica a partir de las necesidades netas de riego en Chocoa. Fuente: propia.

| Mes               | Caudal [m <sup>3</sup> /día*Ha] | Altura [m] | Energía Hidráulica [kWh/día*Ha] |
|-------------------|---------------------------------|------------|---------------------------------|
| <b>Enero</b>      | 7,29                            | 40         | 0,79                            |
| <b>Febrero</b>    | 30,444                          | 40         | 3,31                            |
| <b>Marzo</b>      | 0                               | 40         | -                               |
| <b>Abril</b>      | 0                               | 40         | -                               |
| <b>Mayo</b>       | 0                               | 40         | -                               |
| <b>Junio</b>      | 9,39                            | 40         | 1,02                            |
| <b>Julio</b>      | 0                               | 40         | -                               |
| <b>Agosto</b>     | 6,69                            | 40         | 0,72                            |
| <b>Septiembre</b> | 0                               | 40         | -                               |
| <b>Octubre</b>    | 0                               | 40         | -                               |

|                  |       |    |      |
|------------------|-------|----|------|
| <b>Noviembre</b> | 0     | 40 | -    |
| <b>Diciembre</b> | 24,30 | 40 | 2,64 |

Seguidamente, se procede a determinar el mes de dimensionado con la ecuación 8, que es en el cual se presente mayor necesidad del recurso hídrico. Para esto se determina el cociente entre energía hidráulica y horas solares pico, obteniendo los resultados presentados en la tabla 14 para la vereda Chocóa.

Tabla 14.-Mes de Dimensionamiento en Chocóa. Fuente: propia.

| Mes               | Energía Hidráulica [kWh/día] | HSP [h/día] | Eh/HSP      |
|-------------------|------------------------------|-------------|-------------|
| <b>Enero</b>      | 0,79                         | 5,13        | 0,15        |
| <b>Febrero</b>    | 3,31                         | 5,68        | <b>0,58</b> |
| <b>Marzo</b>      | -                            | 5,09        | -           |
| <b>Abril</b>      | -                            | 4,82        | -           |
| <b>Mayo</b>       | -                            | 4,94        | -           |
| <b>Junio</b>      | 1,02                         | 4,82        | 0,21        |
| <b>Julio</b>      | -                            | 5,18        | -           |
| <b>Agosto</b>     | 0,72                         | 5,57        | 0,13        |
| <b>Septiembre</b> | -                            | 5,41        | -           |
| <b>Octubre</b>    | -                            | 5,27        | -           |
| <b>Noviembre</b>  | -                            | 4,81        | -           |
| <b>Diciembre</b>  | 2,64                         | 5,47        | 0,48        |

Teniendo en cuenta el criterio para determinar el mes de dimensionamiento, el mes de febrero es en el cual existe el mayor cociente entre la energía hidráulica y las horas de sol pico, por ende, este mes se toma como mes crítico, siendo la referencia para hallar el caudal a bombear ( $Q_b$ ) con la ecuación 9. Para la vereda Chocóa el caudal con el que se trabajara para el dimensionamiento fotovoltaico se muestra a continuación en la tabla 15.

Tabla 15.-Caudal a bombear del sistema fotovoltaico en Chocóa. Fuente: propia.

| Mes            | Caudal [ $m^3/día*Ha$ ] | HSP [h/día] | Caudal a bombear [ $m^3/h*Ha$ ] |
|----------------|-------------------------|-------------|---------------------------------|
| <b>Febrero</b> | 30,44                   | 5,68        | 5,35                            |

Con este caudal se procede al dimensionado fotovoltaico y selección de la bomba solar. A continuación en la tabla 16, se muestra el caudal que suple las necesidades netas de riego en una hectárea de limón en las 13 veredas de Girón en el mes de dimensionado ( $Q_b$ ), el cual en todas ellas es el mes de febrero.

Tabla 16.-Necesidades netas de riego en las veredas de Girón. Fuente: propia.

| Vereda       | Caudal<br>[m <sup>3</sup> /día*Ha] | HSP<br>[h/día] | Caudal<br>[m <sup>3</sup> /h*Ha] |
|--------------|------------------------------------|----------------|----------------------------------|
| Chocóa       | 30,44                              | 5,68           | 5,35                             |
| Palogordo    | 30,44                              | 5,61           | 5,41                             |
| Chocoita     | 30,44                              | 5,67           | 5,36                             |
| Cedro        | 32,12                              | 6,04           | 5,31                             |
| Lagunetas    | 32,12                              | 6,05           | 5,3                              |
| Marta        | 32,12                              | 6,05           | 5,3                              |
| Motoso       | 32,12                              | 6,05           | 5,3                              |
| Río Frio     | 32,12                              | 6,05           | 5,3                              |
| Peñas        | 30,44                              | 5,62           | 5,41                             |
| Ruitoque     | 32,12                              | 6,05           | 5,3                              |
| Barbosa      | 32,12                              | 6,05           | 5,3                              |
| Cantalta     | 30,44                              | 5,65           | 5,37                             |
| Llano Grande | 31,38                              | 5,96           | 5,26                             |

Con los datos del caudal que cubre la demanda hídrica por hectárea del cultivo de limón en cada una de las veredas de Girón, se procede a dimensionar los sistemas fotovoltaicos de bombeo con los requisitos de la ADR y el integrado con las características de los sistemas actuales (altura geométrica y longitud de impulsión).

## 6 RESULTADOS

Una vez determinadas las necesidades netas de riego, se presenta a continuación los resultados del dimensionamiento de los sistemas fotovoltaico de bombeo a 40 m de altura y los sistemas fotovoltaicos integrados a las condiciones de altura geométrica (Hg) y longitud de bombeo de los sistemas actuales.

### 6.1 Sistemas fotovoltaicos de bombeo dimensionado con las características de los sistemas de bombeo actuales en Chocoa y Chocoita

Para la integración del sistema fotovoltaico de bombeo en los sistemas actuales de riego, se efectuó una comparación de bombas con el objetivo de suplir el caudal de riego demandado en una hectárea (Qb), teniendo en cuenta la altura geométrica y longitud de impulsión a la cual operan los sistemas actuales de bombeo. De acuerdo con estos requerimientos, se identificaron bombas DC especializadas para la aplicación, de marca Grundfos y Lorentz: Grundfos 25 SQF-7, Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 y Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7. Los datos técnicos se encuentran en los anexos 2,3 y 4.

#### 6.1.1 Análisis de pérdidas hidráulicas en el sistema de bombeo fotovoltaico

El cálculo de pérdidas hidráulicas del sistema fotovoltaico se realiza de la misma manera que en los sistemas de bombeo actuales, teniendo en cuenta que el caudal con el que se trabaja es el que cubre las necesidades netas de riego en una hectárea de cultivo (Qb). Para el análisis de pérdidas y dimensionamiento del sistema fotovoltaico, se necesitan los siguientes datos generales observados en la tabla 17:

Tabla 17.-Datos generales sistema fotovoltaico. Fuente: propia.

| Datos generales                                   |           |                   |
|---|-----------|-------------------|
| Gravedad  | 9,81      | m/s <sup>2</sup>  |
| Densidad del agua                                 | 1.000     | kg/m <sup>3</sup> |
| Viscosidad Dinámica del agua                      | 0,001     | Pa.s              |
| Coefficiente de rugosidad absoluta PVC $\epsilon$ | 0,0000015 | m                 |

Para la vereda Chocoa, el caudal que se necesita para cubrir la demanda hídrica en una hectárea del cultivo es 5,35 m<sup>3</sup>/h (0,001488 m<sup>3</sup>/s) (Qb). A continuación, se presenta un ejemplo de la integración del sistema fotovoltaico de bombeo con el sistema Chocoa 17, y posterior a esto, se presentan los resultados de la integración en los 8 sistemas de las veredas Chocoa y Chocoita. La tabla 18 muestra la altura total (Htotal) después de realizar el análisis de perdidas hidráulicas mayores (Hd) con las 3 bombas solares para el sistema Chocoa 17, utilizando las ecuaciones 10-14:

Tabla 18.-Punto de operación del sistema fotovoltaico en Chocoa 17 con las 3 bombas solares. Fuente: propia.

| Bomba solar                                 | 25 SQF-7  | C-SJ5-12  | C-SJ8-7   |         |
|---|-----------|-----------|-----------|---------|
| <b>Altura geométrica</b>                    | 19        | 19        | 19        | m       |
| <b>Caudal</b>                               | 0,00149   | 0,00149   | 0,00149   | $m^3/s$ |
| <b>Longitud tubería</b>                     | 45,3      | 45,3      | 45,3      | m       |
| <b>Diámetro impulsión</b>                   | 0,0381    | 0,0381    | 0,0508    | m       |
| <b>Factor de Fricción</b>                   | 0,0210429 | 0,0210429 | 0,0224096 | [-]     |
| <b>Altura total</b>                         | 21,17     | 21,17     | 19,54     | m       |
| <b>Altura pérdidas mayores por fricción</b> | 2,17      | 2,17      | 0,54      | m       |
| <b>Reynolds</b>                             | 49.733,34 | 49.733,34 | 37.300    | -       |

### 6.1.2 Potencia eléctrica en el sistema de bombeo fotovoltaico

Seguidamente con los datos de altura total ( $H_{total}$ ) y el caudal ( $Q_b$ ) que debe suplir el sistema de bombeo solar en el sitio, se utiliza la gráfica con las curvas característica de la bomba solar para determinar la potencia eléctrica que consume en este punto de funcionamiento. En los anexos 11, 12 y 13, se presenta el punto de funcionamiento y la potencia eléctrica que consumen las 3 bombas solares en el sistema Chocoa 17 utilizando las curvas características.

La potencia eléctrica que demanda cada bomba solar en el sistema Chocoa 17, se presenta a continuación en la tabla 19:

Tabla 19.-Potencia eléctrica de las bombas solares en el sistema Chocoa 17. Fuente: propia

| Bomba Solar                           | 25 SQF7 | C-SJ5-12 | C-SJ8-7 |    |
|---------------------------------------|---------|----------|---------|----|
| <b>Potencia eléctrica de la bomba</b> | 0,72    | 0,82     | 0,52    | kW |

### 6.1.3 Eficiencia del sistema de bombeo fotovoltaico

Con el caudal ( $Q_b$ ) y altura total de bombeo ( $H_{total}$ ), se procede a calcular la potencia de fluido en el sistema con las 3 bombas para el sistema Chocoa 17 con la ecuación 15. Seguidamente, se determina la eficiencia con la que operan las 3 bombas solares en el punto de funcionamiento con la ecuación 16, observándose los valores presentados en la tabla 20:

Tabla 20.- Potencia de fluido y eficiencia de las bombas solares en Chocoa 17. Fuente: propia.

| Bomba solar              | 25 SQF7 | C-SJ5-12 | C-SJ8-7     |    |
|--------------------------|---------|----------|-------------|----|
| Potencia eléctrica bomba | 0,72    | 0,82     | 0,52        | kW |
| Potencia fluido          | 0,3     | 0,3      | 0,28        | kW |
| Eficiencia bomba         | 0,42    | 0,37     | <b>0,54</b> | -  |

Se puede observar que la bomba Lorentz C-SJ8-7 es la que mejor rendimiento presenta en el sistema Chocoa 17.

#### 6.1.4 Potencia pico a instalar de módulos fotovoltaico en el sistema de bombeo solar

Para el cálculo de la potencia pico a instalar, es necesario determinar el performance ratio (índice de rendimiento) con el que operaría el arreglo fotovoltaico en el sitio de la instalación. El performance ratio se calculó en cada una de las veredas de Girón, mediante el software PVsyst en un sistema conectado a red. Para la vereda de Chocoa se muestra a continuación las pérdidas mediante el diagrama Sankey en la figura 13:

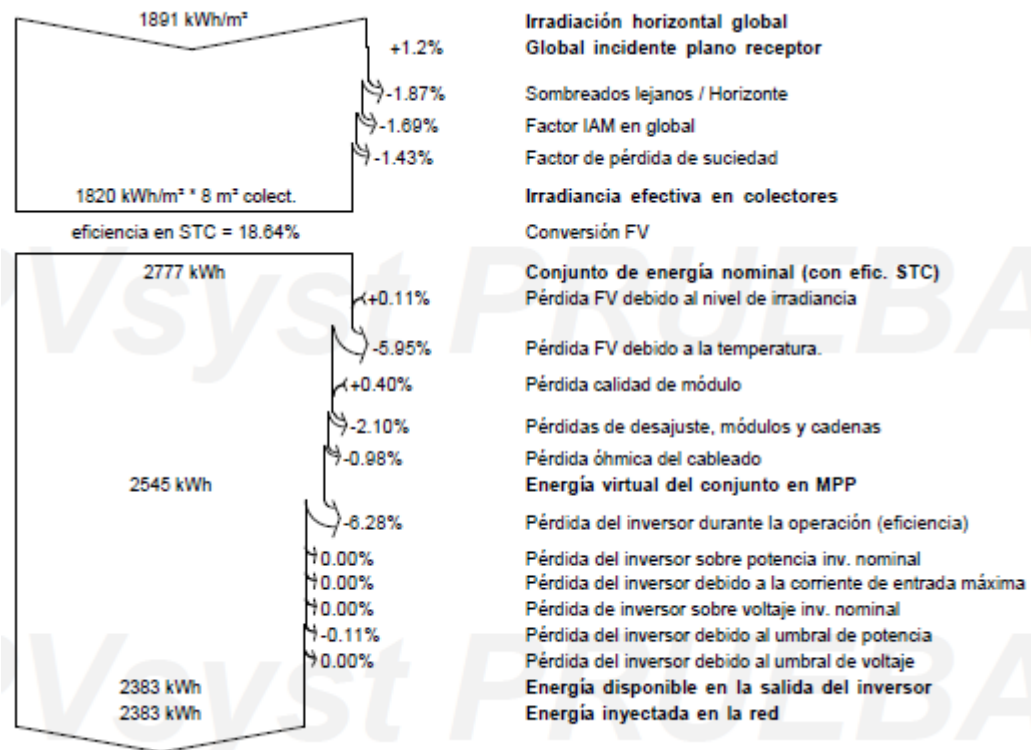


Figura 13.-Diagrama de pérdidas Sankey para Chocoa. Fuente: propia a partir de Software PVsyst

Entre las pérdidas del campo solar presentadas en el diagrama de Sankey, se tienen las pérdidas debido al inversor, las cuales no se deben considerar en el performance ratio global debido a que el sistema de bombeo fotovoltaico no cuenta con dicho dispositivo. Teniendo en cuenta lo anterior y cada una de las pérdidas presentadas en el diagrama, el performance ratio global del campo solar, para la vereda Chocóa, es de 0,88.

Determinado el performance ratio global y con una eficiencia del controlador de 95%, se calcula la potencia pico a instalar de módulos fotovoltaicos, para suplir la potencia eléctrica que demanda cada una de las bombas solares con la ecuación 17 en el sistema Chocóa 17. A continuación se presenta los resultados en la tabla 21.

Tabla 21.-Potencia pico a instalar de módulos fotovoltaicos en Chocóa 17. Fuente: propia.

| <b>Bomba solar</b>              | <b>25 SQF-7</b> | <b>C-SJ5-12</b> | <b>C-SJ8-7</b> |    |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|----|
| <b>Potencia pico a instalar</b> | 0,86            | 0,98            | <b>0,62</b>    | kW |

Como se puede observar en los resultados de la tabla 22, la bomba Lorentz C-SJ8-7 es la que menor potencia pico a instalar demanda en el sistema Chocóa 17. Con los resultados de eficiencia y potencia pico a instalar, se selecciona esta bomba para determinar el número de paneles a instalar en este sistema.

### 6.1.5 Número de paneles en el sistema de bombeo fotovoltaico

De acuerdo a la potencia pico que demanda el sistema de bombeo con la bomba de mejor rendimiento (Lorentz C-SJ8-7), se debe instalar cierto número de paneles fotovoltaicos que suplan dicho requerimiento energético con la ecuación 18. Dicho número de paneles se obtuvo variando la potencia de módulos, como se muestra en la tabla 22.

Tabla 22.-Numero de paneles a instalar con diferentes potencias de módulos fotovoltaicos en Chocóa 17. Fuente: propia.

| <b>Número de Paneles</b> | <b>Potencia Modulo Fotovoltaico [W]</b> |            |            |             |
|--------------------------|---|------------|------------|-------------|
|                          | <b>240</b>                              | <b>280</b> | <b>300</b> | <b>315</b>  |
| <b>C-SJ8-7</b>           | 2,59                                    | 2,22       | 2,07       | <b>1,97</b> |

El número de paneles a instalar en el sistema fotovoltaico en Chocóa 17, será de 2 paneles de 315 W.

A continuación, las siguientes tablas muestran los resultados de la integración del sistema de bombeo fotovoltaico en cada uno de los sistemas en las veredas de Chocoa y Chocoita con las 3 bombas solares.

### 6.1.6 Vereda Chocoa

Para cada uno de los sistemas de la vereda Chocoa, se dimensiono la integración de los sistemas fotovoltaicos con las 3 bombas solares. Posteriormente, se seleccionó la bomba que mejor rendimiento tenga y menor potencia pico a instalar demande, para hallar el número de paneles que necesita con el fin de cubrir la demanda energética al momento de suplir la demanda hídrica de una hectárea de limón.

#### 6.1.6.1 Punto de funcionamiento de los sistemas de bombeo solar en la vereda Chocoa

La tabla 23 muestra la altura total de bombeo, la potencia del fluido y la potencia eléctrica de las 3 bombas solares integradas en cada uno de los sistemas de la vereda Chocoa.

Tabla 23.-Punto de funcionamiento de las bombas solares en los sistemas de la vereda Chocoa. Fuente: propia.

| Lugar     | Bomba Solar               | Punto de funcionamiento |                      |                     |
|-----------|---------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|
|           |                           | Altura total [m]        | Potencia fluido [kW] | Potencia bomba [kW] |
| Chocoa 7  | Grundfos 25 SQF-7         | 9,85                    | 0,14                 | 0,45                |
|           | Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 | 9,85                    | 0,14                 | (-)*                |
|           | Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7  | 5,48                    | 0,08                 | (-)*                |
| Chocoa 10 | Grundfos 25 SQF-7         | 24,44                   | 0,36                 | 0,84                |
|           | Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 | 24,44                   | 0,36                 | 0,86                |
|           | Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7  | 13,65                   | 0,2                  | 0,38                |
| Chocoa 14 | Grundfos 25 SQF-7         | 30,47                   | 0,44                 | 1,02                |
|           | Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 | 30,47                   | 0,44                 | 0,99                |
|           | Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7  | 16,67                   | 0,24                 | 0,46                |



|           |                           |       |      |      |
|-----------|---------------------------|-------|------|------|
| Chocoa 17 | Grundfos 25 SQF-7         | 21,17 | 0,31 | 0,72 |
|           | Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 | 21,17 | 0,31 | 0,82 |
|           | Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7  | 19,55 | 0,29 | 0,52 |

(-)\*: Indica que la bomba no trabaja a esa altura de bombeo.

De esta forma, la bomba Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7 es la que menor potencia eléctrica demanda, a excepción del sistema Chocoa 7, en el cual la bomba que mejor opera a esa baja altura de bombeo es la bomba Grundfos 25 SQF-7.

### 6.1.6.2 Eficiencia y potencia pico a instalar en los sistemas de la vereda Chocoa

La tabla 24 muestra la eficiencia en el punto de funcionamiento del sistema de bombeo solar y la potencia pico a instalar de paneles en cada uno de los sistemas de la vereda Chocoa con las 3 bombas solares.

Tabla 24.- Eficiencia y potencia pico para la vereda Chocoa. Fuente: propia.

| Lugar     | Bomba Solar               | Eficiencia | Potencia Pico Generador Fotovoltaico [kW] |
|-----------|---------------------------|------------|---|
| Chocoa 7  | Grundfos 25 SQF-7         | 31,96%     | 0,53                                      |
|           | Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 | (-)*       | (-)*                                      |
|           | Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7  | (-)*       | (-)*                                      |
| Chocoa 10 | Grundfos 25 SQF-7         | 42,47%     | 1,00                                      |
|           | Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 | 41,49%     | 1,02                                      |
|           | Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7  | 52,44%     | 0,45                                      |
| Chocoa 14 | Grundfos 25 SQF-7         | 43,61%     | 1,22                                      |
|           | Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 | 44,93%     | 1,18                                      |
|           | Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7  | 52,90%     | 0,55                                      |
| Chocoa 17 | Grundfos 25 SQF-7         | 42,93%     | 0,86                                      |
|           | Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 | 37,70%     | 0,98                                      |
|           | Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7  | 54,89%     | 0,62                                      |

(-)\*: Indica que la bomba no trabaja a esa altura de bombeo.

Conforme a esto, la bomba Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7 es la que mayor eficiencia desempeña y menor cantidad de potencia pico a instalar requiere, a excepción del sistema Chocoa 7 en el cual la única bomba que opera en ese punto de funcionamiento es la bomba Grundfos 25 SQF-7

### 6.1.6.3 Número de paneles en los sistemas de bombeo solar en la vereda Chocoa

El número total de paneles a instalar se halló realizando iteraciones de potencia con paneles disponibles comercialmente, en un rango comprendido entre 240W-400W, determinando la combinación de potencia - cantidad más cercana a la potencia pico a instalar, según lo requerido por la bomba preseleccionada con mejor desempeño en cada lugar. La tabla 25 muestra la mejor selección del panel dependiendo del número de estos a utilizar en cada sistema de la vereda Chocoa.

Tabla 25.-Numero de paneles a instalar en los sistemas de la vereda Chocoa. Fuente: propia.

| Lugar     | Bomba Solar              | Potencia Modulo Fotovoltaico [W] |             |      |             |
|-----------|--------------------------|----------------------------------|-------------|------|-------------|
|           |                          | 240                              | 280         | 300  | 315         |
| Chocoa 7  | Grundfos 25 SQF-7        | 2,24                             | <b>1,92</b> | 1,79 | 1,71        |
| Chocoa 10 | Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7 | <b>1,89</b>                      | 1,62        | 1,52 | 1,44        |
| Chocoa 14 |                          | 2,29                             | <b>1,97</b> | 1,83 | 1,75        |
| Chocoa 17 |                          | 2,59                             | 2,22        | 2,07 | <b>1,97</b> |

Para los sistema de la vereda Chocoa, la potencia del panel a seleccionar y el número a instalar de estos, queda de la siguiente manera: Chocoa 7 con 2 paneles de 280 W, Chocoa 10 con 2 paneles de 240 W, Chocoa 14 con 2 paneles de 280 W y Chocoa 17 con 2 paneles de 315 W.

### 6.1.7 Vereda Chocoita

Para cada uno de los sistemas de la vereda Chocoita se realizó, de igual forma que en los sistemas de la vereda Chocoa, la integración del sistema fotovoltaico que supla la demanda hídrica de una hectárea de limón y permita la disminución de los costos de bombeo.

### 6.1.7.1 Punto de funcionamiento de los sistemas de bombeo solar en la vereda Chocoita

La tabla 26 muestra la altura total de bombeo, la potencia del fluido y eléctrica de las 3 bombas solares en cada uno de los sistemas de la vereda Chocoita.

Tabla 26.-Punto de funcionamiento de las bombas solares en los sistemas de la vereda Chocoita. Fuente: propia.

| Lugar       | Bomba Solar               | Punto de funcionamiento |                      |                     |
|-------------|---------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|
|             |                           | Altura total [m]        | Potencia fluido [kW] | Potencia bomba [kW] |
| Chocoita 1  | Grundfos 25 SQF-7         | 16,36                   | 0,24                 | 0,59                |
|             | Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 | 16,36                   | 0,24                 | (-)*                |
|             | Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7  | 11,61                   | 0,17                 | 0,31                |
| Chocoita 10 | Grundfos 25 SQF-7         | 29,59                   | 0,43                 | 1,03                |
|             | Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 | 29,59                   | 0,43                 | 0,98                |
|             | Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7  | 19,43                   | 0,28                 | 0,53                |
| Chocoita 13 | Grundfos 25 SQF-7         | 18,41                   | 0,27                 | 0,66                |
|             | Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 | 18,41                   | 0,27                 | 0,77                |
|             | Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7  | 16,61                   | 0,24                 | 0,44                |
| Chocoita 19 | Grundfos 25 SQF-7         | 50,49                   | 0,74                 | (-)*                |
|             | Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 | 50,49                   | 0,74                 | 1,46                |
|             | Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7  | 40,41                   | 0,59                 | 1,31                |

(-)\*: Indica que la bomba no trabaja a esa altura de bombeo.

De esta forma para los sistemas de la vereda Chocoita, la bomba Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7 es la que requiere menor potencia eléctrica para operar en el punto de funcionamiento que cubra la demanda hídrica en esta vereda.

### 6.1.7.2 Eficiencia y potencia pico a instalar de los sistemas de bombeo solar en la vereda Chocoita

La tabla 27 muestra la eficiencia en el punto de funcionamiento del sistema y la potencia pico a instalar de módulos fotovoltaicos con cada una de las bombas solares.

Tabla 27.-Eficiencia y potencia pico a instalar en los sistemas de la vereda Chocoita.  
Fuente: propia.

| Lugar       | Bomba Solar               | Eficiencia | Potencia Pico Generador Fotovoltaico [kW] |
|-------------|---------------------------|------------|---|
| Chocoita 1  | Grundfos 25 SQF-7         | 40,58%     | 0,69                                      |
|             | Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 | (-)*       | (-)*                                      |
|             | Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7  | 54,79%     | 0,36                                      |
| Chocoita 10 | Grundfos 25 SQF-7         | 42,03%     | 1,22                                      |
|             | Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 | 44,18%     | 1,16                                      |
|             | Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7  | 53,65%     | 0,62                                      |
| Chocoita 13 | Grundfos 25 SQF-7         | 40,81%     | 0,78                                      |
|             | Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 | 34,98%     | 0,91                                      |
|             | Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7  | 55,23%     | 0,52                                      |
| Chocoita 19 | Grundfos 25 SQF-7         | (-)*       | (-)*                                      |
|             | Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 | 50,60%     | 1,73                                      |
|             | Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7  | 45,14%     | 1,55                                      |

(-)\*: Indica que la bomba no trabaja a esa altura de bombeo.

Con lo anterior, la bomba Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7 es la que necesita menor cantidad de potencia pico a instalar y presenta mayor eficiencia, a excepción del sistema Chocoita 19 donde la bomba Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 tiene mejor desempeño.

### 6.1.7.3 Número de paneles en los sistemas de bombeo solar en la vereda Chocoita

El número total de paneles a instalar se determinó variando la potencia de los paneles de 275-400 W, determinando la combinación de potencia - cantidad más cercana a la potencia pico a instalar, según lo requerido por la bomba preseleccionada con mejor desempeño en cada lugar. La tabla 28 muestra la mejor selección del panel dependiendo del número de estos a utilizar en el lugar del bombeo.

Tabla 28.-Numero de paneles en los sistemas de la vereda Chocoita. Fuente: propia.

| Lugar       | Bomba Solar              | Potencia Modulo Fotovoltaico [W] |             |      |             |
|-------------|--------------------------|----------------------------------|-------------|------|-------------|
|             |                          | 275                              | 315         | 320  | 375         |
| Chocoita 1  | Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7 | 1,34                             | 1,17        | 1,15 | <b>0,98</b> |
| Chocoita 10 |                          | 2,29                             | <b>1,99</b> | 1,96 | 1,68        |
| Chocoita 13 |                          | <b>1,90</b>                      | 1,66        | 1,63 | 1,39        |
| Chocoita 19 |                          | 5,65                             | <b>4,93</b> | 4,86 | 4,15        |

Para los sistemas de la vereda Chocoita, según la información de la tabla 28, la potencia del panel a seleccionar y el número de estos a instalar queda de la siguiente manera: Chocoita 1 con 1 panel de 375 W, Chocoita 10 con 2 paneles de 315 W, Chocoita 13 con 2 paneles de 275 W y Chocoita 19 con 5 paneles de 315 W.

## 6.2 Dimensionado del sistema de bombeo fotovoltaico con los requisitos de la ADR en las veredas de Girón.

El sistema fotovoltaico, con los requerimientos de la ADR, se dimensiona a una altura total de bombeo de 40 m y un caudal que supla las necesidades netas de riego en una hectárea de limón en las 13 veredas de Girón (Qb). Para su dimensionamiento se utiliza la curva característica de las 3 bombas solares a una altura de 40 m obtenida a partir de Curve Expert, y se obtiene la ecuación de la curva con la herramienta Excel. Las imágenes de las ecuaciones de la curva característica de las bombas solares a una altura de bombeo de 40 m, se encuentran en los anexos 7,8 y 9.

### 6.2.1 Potencia eléctrica de las bombas solares en las veredas de Girón

La tabla 29 muestra las potencias eléctricas de las bombas solares en las 13 veredas de Girón, determinadas con la ecuación de la curva característica a 40 m de bombeo y el caudal de bombeo (Qb) que cubre las necesidades netas de riego en cada vereda (tabla 16).

Tabla 29.-Potencia eléctrica de las bombas solares en las veredas de Girón. Fuente: propia.

| Vereda       | Potencia Eléctrica Bomba Grundfos 25 SQF-7 [W] | Potencia Eléctrica Bomba Lorentz C-SJ8-7 [W] | Potencia Eléctrica Bomba Lorentz C-SJ5-12 [W] |
|--------------|--|--|---|
| Chocoa       | 1.355,87                                       | 1.309,89                                     | 1.226,33                                      |
| Palogordo    | 1.370,61                                       | 1.320,09                                     | 1.244,82                                      |
| Chocoita     | 1.358,80                                       | 1.311,92                                     | 1.230,00                                      |
| Cedro        | 1.344,77                                       | 1.302,21                                     | 1.212,46                                      |
| Lagunetas    | 1.343,12                                       | 1.301,07                                     | 1.210,41                                      |
| Marta        | 1.343,12                                       | 1.301,07                                     | 1.210,41                                      |
| Motoso       | 1.343,12                                       | 1.301,07                                     | 1.210,41                                      |
| Rio Frio     | 1.343,12                                       | 1.301,07                                     | 1.210,41                                      |
| Peñas        | 1.369,70                                       | 1.319,46                                     | 1.243,67                                      |
| Ruitoque     | 1.343,12                                       | 1.301,07                                     | 1.210,41                                      |
| Barbosa      | 1.343,12                                       | 1.301,07                                     | 1.210,41                                      |
| Cantalta     | 1.361,24                                       | 1.313,61                                     | 1.233,06                                      |
| Llano Grande | 1.333,59                                       | 1.294,47                                     | 1.198,54                                      |

De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 29, la bomba Lorentz C-SJ5-12 es la que requiere menor potencia eléctrica para trabajar en los sistemas fotovoltaicos de bombeo en las 13 veredas de Girón.

### 6.2.2 Eficiencia de las bombas solares en las veredas de Girón

Para determinar la eficiencia de las bombas en cada una de las diferentes veredas, se calcula la potencia del fluido en el punto de operación con la ecuación 15. En la tabla 30, se presenta la eficiencia de las 3 bombas solares en cada vereda de Girón determinada con la ecuación 16, partiendo de la potencia eléctrica de las bombas y la potencia del fluido.

Tabla 30.- Potencia del fluido y Eficiencia de las bombas solares en las veredas de Girón.

Fuente: propia.

| Vereda    | Potencia del fluido [W] | Eficiencia Bomba Grundfos 25 SQF-7 | Eficiencia Bomba Lorentz C-SJ8-7 | Eficiencia Bomba Lorentz C-SJ5-12 |
|-----------|-------------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Chocoa    | 583,97                  | 43,07%                             | 44,58%                           | 47,62%                            |
| Palogordo | 590,66                  | 43,09%                             | 44,74%                           | 47,45%                            |
| Chocoita  | 585,30                  | 43,08%                             | 44,61%                           | 47,59%                            |

|              |        |        |        |        |
|--------------|--------|--------|--------|--------|
| Cedro        | 578,92 | 43,05% | 44,46% | 47,75% |
| Lagunetas    | 578,17 | 43,05% | 44,44% | 47,77% |
| Marta        | 578,17 | 43,05% | 44,44% | 47,77% |
| Motoso       | 578,17 | 43,05% | 44,44% | 47,77% |
| Rio Frio     | 590,25 | 43,05% | 44,44% | 47,77% |
| Peñas        | 578,17 | 43,09% | 44,73% | 47,46% |
| Ruitoque     | 578,17 | 43,05% | 44,44% | 47,77% |
| Barbosa      | 586,41 | 43,05% | 44,44% | 47,77% |
| Cantalta     | 573,82 | 43,08% | 44,64% | 47,56% |
| Llano Grande | 583,97 | 43,03% | 44,33% | 47,88% |

De esta forma, la bomba Lorentz C-SJ5-12 es la que mejor desempeño tiene en todas las veredas con más de 47%.

### 6.2.3 Potencia pico a instalar de módulos fotovoltaicos en las veredas de Girón

Para el cálculo de la potencia pico a instalar, es necesario determinar el performance ratio (índice de rendimiento), con el que operaría el arreglo fotovoltaico en cada una de las diferentes veredas. El performance ratio se determinó con el software PVsyst en las 13 veredas de Girón, mostrándose su valor en la tabla 31:

Tabla 31.-Performance ratio del sistema fotovoltaico en cada vereda de Girón. Fuente: propia a partir de Software PVsyst.

| Vereda       | Performance Ratio |
|--------------|-------------------|
| Chocoa       | 0,88              |
| Palogordo    | 0,8712            |
| Chocoita     | 0,8877            |
| Cedro        | 0,8866            |
| Lagunetas    | 0,857             |
| Marta        | 0,8641            |
| Motoso       | 0,8745            |
| Rio Frio     | 0,8836            |
| Peñas        | 0,8861            |
| Ruitoque     | 0,8836            |
| Barbosa      | 0,8836            |
| Cantalta     | 0,8892            |
| Llano Grande | 0,8791            |

A partir de los datos de performance ratio, la potencia eléctrica de la bomba y la eficiencia del controlador (95%) de los sistemas fotovoltaicos en cada vereda, se determinó la potencia

pico a instalar de paneles solares en el mes de dimensionado en cada una de las veredas de Girón con cada bomba solar con la ecuación 17, observándose los resultados en la tabla 32.

Tabla 32.-Potencia pico a instalar de módulos fotovoltaicos en las veredas de Girón.  
Fuente: propia.

| Vereda       | Potencia Pico Bomba Grundfos 25 SQF-7 [W] | Potencia Pico Bomba Lorentz C-SJ8-7 [W] | Potencia Pico Bomba Lorentz C-SJ5-12 [W] |
|--------------|---|---|--|
| Chocoa       | 1.621,85                                  | 1.566,86                                | 1.466,90                                 |
| Palogordo    | 1.656,05                                  | 1.595,00                                | 1.504,06                                 |
| Chocoita     | 1.611,26                                  | 1.555,67                                | 1.458,53                                 |
| Cedro        | 1.596,60                                  | 1.546,07                                | 1.439,52                                 |
| Lagunetas    | 1.649,72                                  | 1.598,07                                | 1.486,71                                 |
| Marta        | 1.636,16                                  | 1.584,94                                | 1.474,50                                 |
| Motoso       | 1.616,71                                  | 1.566,09                                | 1.456,96                                 |
| Rio Frio     | 1.600,06                                  | 1.549,96                                | 1.441,96                                 |
| Peñas        | 1.627,12                                  | 1.567,44                                | 1.477,40                                 |
| Ruitoque     | 1.600,06                                  | 1.549,96                                | 1.441,96                                 |
| Barbosa      | 1.600,06                                  | 1.549,96                                | 1.441,96                                 |
| Cantalta     | 1.611,43                                  | 1.555,05                                | 1.459,69                                 |
| Llano Grande | 1.596,84                                  | 1.549,99                                | 1.435,13                                 |

De acuerdo a los datos de la tabla 32, la bomba Lorentz C-SJ5-12 es la que requiere menor cantidad de potencia pico a instalar en las 13 veredas de Girón.

#### 6.2.4 Número de paneles a instalar en las veredas de Girón con la bomba de mejor rendimiento

Para hallar el número de paneles a instalar, se seleccionó la bomba Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 por su mayor eficiencia y menor potencia pico a instalar en los sistemas de Girón. En la tabla 33, se muestran las potencias de los paneles con las que se determinó el número de estos a instalar utilizando la ecuación 18, seleccionando el que presente menor sobredimensionamiento.



Tabla 33.-Numero de paneles a instalar en las veredas de Girón. Fuente: propia.

| Vereda       | Bomba                   | Potencia Modulo Fotovoltaico [W] |             |      |      |      |
|--------------|-------------------------|----------------------------------|-------------|------|------|------|
|              |                         | 300                              | 305         | 310  | 315  | 320  |
| Chocoa       | Lorentz<br>C-SJ5-<br>12 | 4,89                             | <b>4,81</b> | 4,73 | 4,66 | 4,58 |
| Palogordo    |                         | 5,01                             | <b>4,93</b> | 4,85 | 4,77 | 4,70 |
| Chocoita     |                         | 4,86                             | <b>4,78</b> | 4,70 | 4,63 | 4,56 |
| Cedro        |                         | 4,80                             | <b>4,72</b> | 4,64 | 4,57 | 4,50 |
| Lagunetas    |                         | 4,96                             | <b>4,87</b> | 4,80 | 4,72 | 4,65 |
| Marta        |                         | 4,91                             | <b>4,83</b> | 4,76 | 4,68 | 4,61 |
| Motoso       |                         | 4,86                             | <b>4,78</b> | 4,70 | 4,63 | 4,55 |
| Rio Frio     |                         | 4,81                             | <b>4,73</b> | 4,65 | 4,58 | 4,51 |
| Peñas        |                         | 4,92                             | <b>4,84</b> | 4,77 | 4,69 | 4,62 |
| Ruitoque     |                         | 4,81                             | <b>4,73</b> | 4,65 | 4,58 | 4,51 |
| Barbosa      |                         | 4,81                             | <b>4,73</b> | 4,65 | 4,58 | 4,51 |
| Cantalta     |                         | 4,87                             | <b>4,79</b> | 4,71 | 4,63 | 4,56 |
| Llano Grande |                         | 4,78                             | <b>4,71</b> | 4,63 | 4,56 | 4,48 |

Se observa en la tabla 33 que el panel de 305 W es el que menor sobredimensionamiento presenta en los sistemas, al ser en el cual el número de paneles se acerca más a un número entero, en este caso con 5 paneles.

#### 6.2.5 Número de paneles en serie y paralelo

Para calcular el número de paneles en serie y paralelo se selecciona un panel marca Canadian Solar CS3K-305W MS. Los datos del panel para la determinación del arreglo fotovoltaico y el resultado de los cálculos utilizando las ecuaciones 19 y 20, se muestran en las tablas 34 y 35, respectivamente.

Tabla 34.-Datos del panel y el controlador de carga. Fuente: propia.

|   |      |   |
|---|------|---|
| <b>Potencia Panel</b>                       | 305  | W |
| <b>Voc de entrada máximo al controlador</b> | 200  | V |
| <b>Voc modulo</b>                           | 39,9 | V |

Tabla 35.-Numero de paneles en serie y paralelo. Fuente: propia.

| Vereda       | Bomba Seleccionada | Número total de paneles de 305 [W] | Módulos en serie | Módulos paralelo |
|--------------|--------------------|------------------------------------|------------------|------------------|
| Chocoa       | Lorentz C-SJ5-12   | 4,81                               | <b>5,013</b>     | 0,959            |
| Palogordo    |                    | 4,93                               |                  | 0,984            |
| Chocoita     |                    | 4,78                               |                  | 0,954            |
| Cedro        |                    | 4,72                               |                  | 0,942            |
| Lagunetas    |                    | 4,87                               |                  | 0,972            |
| Marta        |                    | 4,83                               |                  | 0,964            |
| Motoso       |                    | 4,78                               |                  | 0,953            |
| Rio Frio     |                    | 4,73                               |                  | 0,943            |
| Peñas        |                    | 4,84                               |                  | 0,966            |
| Ruitoque     |                    | 4,73                               |                  | 0,943            |
| Barbosa      |                    | 4,73                               |                  | 0,943            |
| Cantalta     |                    | 4,79                               |                  | 0,955            |
| Llano Grande |                    | 4,71                               |                  | 0,939            |

Conforme al resultado presentado en la tabla 35, el arreglo fotovoltaico, para cumplir con la entrada de voltaje del controlador de la bomba, será de 5 paneles conectados en serie con una potencia total instalada de 1525 W y un voltaje de circuito abierto del arreglo de 199,5 V.

#### 6.2.6 Capacidad de corriente de los conductores y disparo de protecciones

La capacidad de corriente con las que se deben seleccionar los conductores y las protecciones, se determinó a partir de la corriente de cortocircuito del arreglo fotovoltaico, y posteriormente se corrigió con los distintos factores según la NTC 2050. En la tabla 36 se muestra la capacidad de corriente de los conductores utilizando las ecuaciones 21 y 22:

Tabla 36.-Corriente del arreglo fotovoltaico. Fuente: propia.

|  |       |   |
|--|-------|---|
| <b>Isc corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico</b>  | 9,91  | A |
| <b>Icc capacidad de corriente de los conductores</b>           | 12,38 | A |
| <b>Ict capacidad de corriente corregida de los conductores</b> | 11,27 | A |

De acuerdo con la capacidad de corriente corregida de los conductores de la tabla 36, se selecciona el cable fotovoltaico PV XLPE 600V 90 °C SR de calibre 14 AWG.

De igual forma, para la protección contra sobre corrientes antes del controlador, según el artículo 240-6a de la NTC 2050, se selecciona una protección de 15 A. Los controladores Lorentz PS disponen de una protección de sobrecorriente electrónica contra la sobrecarga del motor, por ende no es necesaria una protección entre estos.

Para la desconexión de los conductores, según el artículo 690-13 de la NTC 2050, en el que se establece que se debe instalar un medio que desconecte los conductores portadores en una fuente de energía fotovoltaica de todos los otros conductores, se seleccionaron seccionadores (interruptores) de 1000 V DC para 20 A en la salida del arreglo fotovoltaico. Para la puesta a tierra, según el artículo 690-42,43 de la NTC 2050, se puede hacer en cualquier punto de salida del arreglo fotovoltaico del circuito en DC, por ende se conectara en el terminal negativo del sistema fotovoltaico.

A continuación se presenta en la figura 14, los elementos que conformarían el sistema de bombeo fotovoltaico a una altura de bombeo de 40 m.

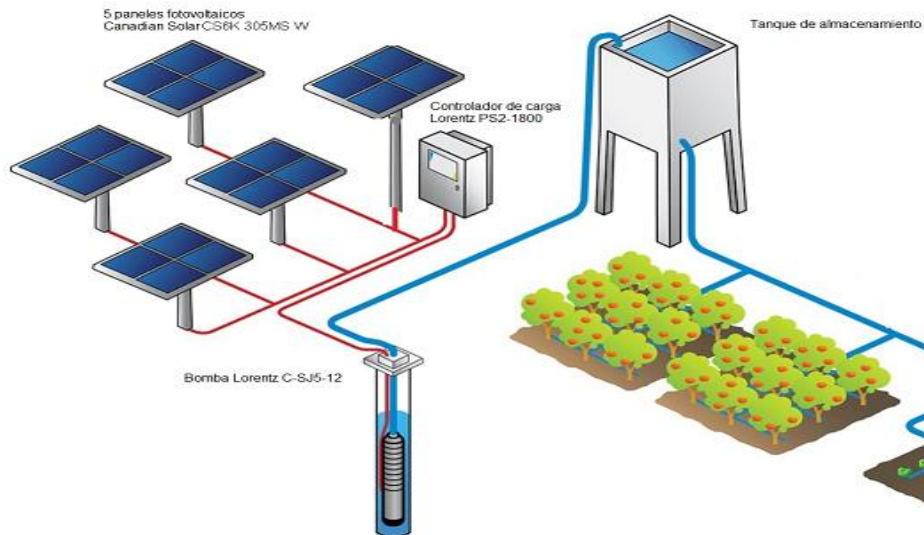


Figura 14.-Esquema fotovoltaico a instalar. Adaptado de: Cambio Energético [14].

### 6.2.7 Angulo de inclinación de los paneles del sistema fotovoltaico en las veredas de Girón

El ángulo de instalación de los paneles fotovoltaicos en cada una de las veredas de Girón se presenta en la tabla 37, determinado con la ecuación 23.

Tabla 37.-Angulo de inclinación. Fuente: propia.

| Vereda       | Latitud [°] | Angulo de inclinación [°] |
|--------------|-------------|---------------------------|
| Chocoa       | 6,95        | 13,04                     |
| Palogordo    | 6,98        | 13,01                     |
| Chocoita     | 6,98        | 13,01                     |
| Cedro        | 7,04        | 12,96                     |
| Lagunetas    | 7,07        | 12,93                     |
| Marta        | 7,11        | 12,88                     |
| Motoso       | 7,03        | 12,96                     |
| Rio Frio     | 7,07        | 12,93                     |
| Peñas        | 6,99        | 13,01                     |
| Ruitoque     | 7,04        | 12,96                     |
| Barbosa      | 7,04        | 12,95                     |
| Cantalta     | 6,97        | 13,03                     |
| Llano Grande | 7,01        | 12,99                     |

Para determinar si el ángulo de inclinación es óptimo en el lugar de instalación, se simuló las pérdidas por orientación, e inclinación, mediante el software PVsyst. La figura 15 muestra el resultado de ángulos de inclinación y azimut, que minimizan las pérdidas, para la vereda Chocoa:

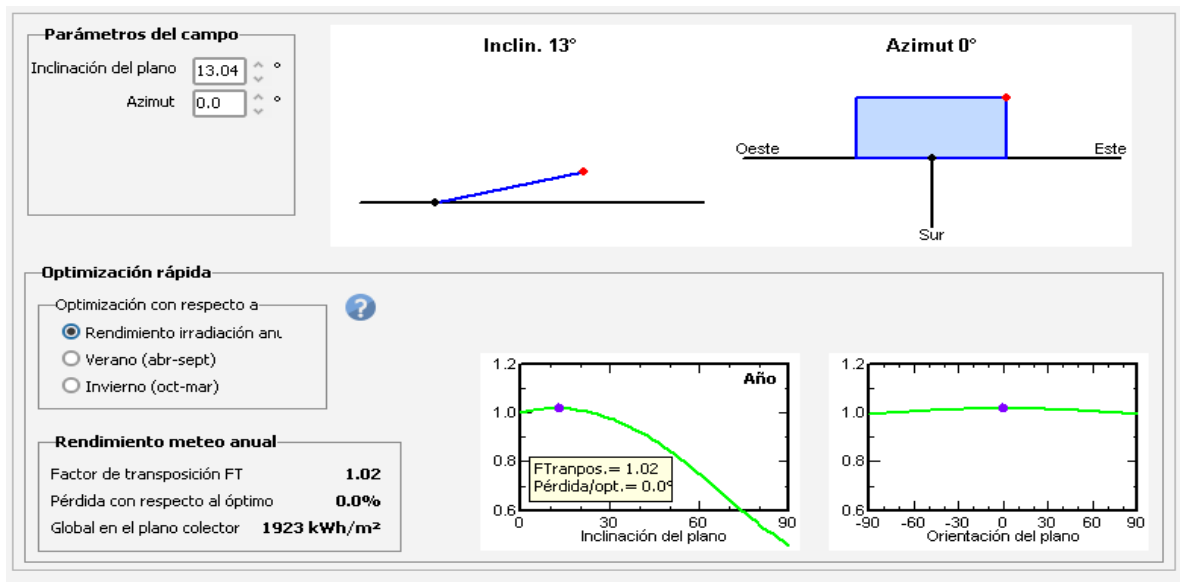


Figura 15.- Inclinación del panel en Chocoa simulado en PVsyst. Fuente: propia

Se puede observar que el rendimiento anual del panel a esta inclinación es la óptima, debido a que las pérdidas son 0%. Este resultado, con respecto a la inclinación del panel, se presentó de igual forma para todas las veredas de Girón.

### 6.3 Costo energético mensual y costo total por hectárea de los sistemas actuales de bombeo en Chocóa y Chocoita

El costo energético de bombeo mensual por hectárea de los sistemas actuales en las veredas de Chocóa y Chocoita, utilizando las ecuaciones 25 y 26, se muestra a continuación en la tabla 38, teniendo en cuenta el caudal mensual hallado en la tabla 7, la energía consumida al mes y el precio de energía en cada vereda (534,81 \$/kWh en Chocóa y 527,71 \$/kWh en Chocoita).

Tabla 38.-Costo energético mensual de los sistemas actuales de bombeo en Chocóa y Chocoita. Fuente: propia.

| Vereda   | Lugar       | Energía consumida [kWh/mes] | Costo Bombeo [\$/m <sup>3</sup> ] | Costo energético [\$/mes*Ha] |
|----------|-------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Chocóa   | Chocóa 7    | 209                         | 635,95                            | \$111.711,11                 |
|          | Chocóa 10   | 12                          | 117,01                            | \$ 19.150,48                 |
|          | Chocóa 14   | 188                         | 465,40                            | \$ 100.540,00                |
|          | Chocóa 17   | 1.003                       | 361,90                            | \$ 536.213,34                |
| Chocoita | Chocoita 1  | 752                         | 131,21                            | \$ 396.821,03                |
|          | Chocoita 10 | 98                          | 357,42                            | \$ 51.963,60                 |
|          | Chocoita 13 | 215                         | 66,22                             | \$ 113.377,44                |
|          | Chocoita 19 | 31                          | 346,38                            | \$ 16.534,21                 |

El costo energético de bombeo por hectárea varía en cada sistema, debido a que los caudales y el precio del metro cubico de agua es diferente en cada lugar. Posteriormente, se realizó la consulta con un experto de la región para determinar el costo de mantenimiento de los sistemas actuales en Chocóa y Chocoita. La tabla 39, muestra el costo total al año de los sistemas de bombeo actuales.

Tabla 39.-Costo total anual de los sistemas actuales de bombeo en Chocóa y Chocóita.  
Fuente: propia.

| Vereda   | Lugar       | Costo de mantenimiento<br>[\$/año] | Costo energético<br>[\$/año*Ha] | Costo total<br>[\$/año*Ha] |
|----------|-------------|------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Chocóa   | Chocóa 7    | \$380.000                          | \$1.340.533,35                  | \$1.720.533,35             |
|          | Chocóa 10   |                                    | \$229.805,72                    | \$609.805,72               |
|          | Chocóa 14   |                                    | \$1.206.480,02                  | \$1.586.480,02             |
|          | Chocóa 17   |                                    | \$6.434.560,10                  | \$6.814.560,10             |
| Chocóita | Chocóita 1  |                                    | \$4.761.852,40                  | \$5.141.852,40             |
|          | Chocóita 10 |                                    | \$623.563,24                    | \$1.003.563,24             |
|          | Chocóita 13 |                                    | \$1.360.529,26                  | \$1.740.529,26             |
|          | Chocóita 19 |                                    | \$198.410,52                    | \$578.410,52               |

#### 6.4 Costo de operación y mantenimiento anual de los sistemas de bombeo fotovoltaico

A continuación, en la tabla 40 se determinó el costo de operación y mantenimiento de los sistemas de bombeo fotovoltaico, considerando que las potencias fotovoltaicas instaladas son diferentes en cada sistema. Para el dato del costo debido al trabajo de mantenimiento en el sistema fotovoltaico, fue consultada la base de datos del NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) para el 2020 [15], el cual para este año es de 15,69 USD por kilovatio instalado al año. El precio del dólar utilizado para la conversión a moneda local fue de 3.653,1 pesos colombianos. La determinación del costo de operación y mantenimiento de sistema fotovoltaico se realizó de la siguiente manera:

$$\text{Costo O\&M Sistema fotovoltaico} = \text{Costo O\&M NREL} * Pp$$

Donde:

*Costo O&M Sistema fotovoltaico*, \$/año.

*Costo O&M NREL*= \$/kW\*año

*Pp*= Potencia pico a instalar, kW.

Para el costo de operación y mantenimiento de la bomba solar, se realizó la consulta con un experto que realiza el servicio de mantenimiento de sistemas de bombeo de la región, quien costea un valor de 390.000 \$/año.

Tabla 40.-Costo de operación y mantenimiento de los sistemas de bombeo fotovoltaico.  
Fuente: propia.

| Sistema            | Potencia pico instalada [kW] | Costo de O&M sistema fotovoltaico NREL [\$/ año] | Costo de O&M del sistema de bombeo [\$/año] | Costo total O&M del sistema de bombeo fotovoltaico [\$/año] |
|--------------------|------------------------------|--|---|---|
| <b>40 m</b>        | 1,53                         | \$87.428,94                                      | \$390.000                                   | \$477.428,94  |
| <b>Chocoa 7</b>    | 0,56                         | \$32.105,05                                      |   | \$422.105,05  |
| <b>Chocoa 10</b>   | 0,48                         | \$27.518,62                                      |   | \$417.518,62  |
| <b>Chocoa 14</b>   | 0,56                         | \$32.105,05                                      |   | \$ 422.105,05   |
| <b>Chocoa 17</b>   | 0,63                         | \$36.118,18                                      |   | \$426.118,18  |
| <b>Chocoita 1</b>  | 0,38                         | \$21.498,92                                      |   | \$411.498,92  |
| <b>Chocoita 10</b> | 0,63                         | \$36.118,18                                      |   | \$426.118,18  |
| <b>Chocoita 13</b> | 0,55                         | \$31.531,75                                      |   | \$421.531,75  |
| <b>Chocoita 19</b> | 1,58                         | \$90.295,46                                      |   | \$480.295,46  |

## 6.5 Ahorro anual por la integración del sistema de bombeo fotovoltaico

El ahorro anual de los sistemas por la implementación del bombeo fotovoltaico, se determinó mediante la diferencia entre los costos totales de la línea base, correspondiente a los sistemas actuales de bombeo (tabla 39) y el costo de operación y mantenimiento del sistema de bombeo fotovoltaico (tabla 40). Los resultados son presentados a continuación en la tabla 41.

Tabla 41.-Ahorro anual en los sistemas por la implementación de bombeo fotovoltaico en Chocoa y Chocoita. Fuente: propia.

| Vereda   | Lugar       | Ahorro [\$/año] |
|----------|-------------|-----------------|
| Chocoa   | Chocoa 7    | \$1.298.428,30  |
|          | Chocoa 10   | \$192.287,10    |
|          | Chocoa 14   | \$1.164.374,96  |
|          | Chocoa 17   | \$6.388.441,91  |
| Chocoita | Chocoita 1  | \$4.730.353,48  |
|          | Chocoita 10 | \$577.445,06    |
|          | Chocoita 13 | \$1.318.997,51  |
|          | Chocoita 19 | \$98.115,05     |

De acuerdo a la tabla 41, los ahorros anuales por hectárea varían en cada sistema, debido a que los caudales de riego, en la mayoría de los casos están sobredimensionados y el precio del bombeo de un metro cubico de agua es diferente en cada lugar.



## 7 CONCLUSIONES

- Al determinar las necesidades netas de riego para una hectárea cultivada de limón en las veredas de Girón objeto del proyecto, se determinó que varían, en el mes crítico, desde  $31,37 \text{ m}^3/\text{día}$  (Llano grande) a  $30,44 \text{ m}^3/\text{día}$  (Palogordo), y para ser suplida esta demanda por medio del sistema de bombeo fotovoltaico, varían diariamente desde  $5,26 \text{ m}^3/\text{h}$  a  $5,41 \text{ m}^3/\text{h}$ , respectivamente.
- Se realizó la caracterización de los sistemas actuales de bombeo, donde se encontró que el 75% de los sistemas actuales de bombeo de la vereda Chocóa y el 50% de la vereda Chocoita operan a un valor de caudal muy por debajo del que se necesita para cubrir la demanda hídrica diaria de una hectárea de cultivo de limón en estas veredas. Los demás sistemas, en cada una de las veredas, evidencian un sobredimensionamiento en su caudal diario suministrado.
- Al dimensionar el sistema fotovoltaico de bombeo, se encontró que el más adecuado a utilizar en las veredas de estudio, para satisfacer las necesidades netas de riego, a una altura estandarizada de 40 m; es el sistema compuesto por la bomba Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12, con una eficiencia mayor al 47%, y la potencia fotovoltaica determinada para esta altura es de 1.525 W. Siendo la selección de la bomba, el aspecto técnico más crítico de dimensionado.
- En la integración de los sistemas fotovoltaicos a los sistemas actuales de bombeo, la bomba solar Lorentz PS2-1800 C-SJ8-7 es la que mejor opera con eficiencias entre 45,14 % a 55,23 %, a excepción del sistema Chocóa 7, donde se presenta baja altura de bombeo y la bomba Grundfos 25 SQF-7 es la que consigue mejor punto de operación de las analizadas, con una eficiencia de 31,96%.
- El ahorro anual por hectárea debido a la integración de los sistemas fotovoltaicos de bombeo en la vereda Chocóa varía en función del consumo energético determinado como línea base, desde \$ 192.287 para un cultivo con riego que opera sub-dimensionado (Chocóa 10), hasta \$6.388.441,91 para un sistema sobredimensionado (Chocóa 17). Para el caso de la vereda Chocoita varía desde \$98.115,05 (Chocoita 19) hasta \$4.730.353,48 (Chocoita 1) al año.
- Con la implementación de los sistemas de bombeo fotovoltaico, se beneficiarían alrededor de 104 familias del municipio de Girón, que podrán mejorar la productividad por la satisfacción del total de necesidades de riego, y la disminución del costo de bombeo en una hectárea de cultivo de limón.

## 8 RECOMENDACIONES

- Para el sistema de conducción de agua, se recomienda el uso de tubería de PVC, ya que el sistema hidráulico fue diseñado con las características de este material.
- Al seleccionar el conjunto controlador bomba, se recomienda utilizar ambos elementos del mismo fabricante, o en su defecto verificar compatibilidad con los fabricantes, ya que se pueden presentar problemas técnicos por este aspecto.
- Al caracterizar los sistemas actuales, se encontró como particularidad el sobre y sub dimensionamiento del caudal al que operan las bombas, por lo tanto, se recomienda ajustarlo al que cubra las necesidades netas de riego presentadas en este documento.
- Al momento de considerar los costos de mantenimiento, se debe tener especial consideración el costo asociado al desplazamiento del experto al lugar de ubicación del sistema, que puede incrementar considerablemente para zonas de difícil acceso, respecto a los valores que se ofrecen en ciudades principales.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] W. Giraldo, Diana; Granados, “CADENA DE CÍTRICOS Indicadores e Instrumentos Marzo 2018.” Accessed: Jul. 10, 2020. [Online]. Available: [https://sioc.minagricultura.gov.co/Citricos/Documentos/2018-03-30 Cifras Sectoriales.pdf](https://sioc.minagricultura.gov.co/Citricos/Documentos/2018-03-30_Cifras_Sectoriales.pdf).
- [2] M. A. Abella and F. C. R. Romero, “Sistemas de Bombeo Fotovoltaico,” *Ing. Mec.*, p. 60, 2005.
- [3] M. G. Thomas, “Water pumpig: The Solar Alternative,” Albuquerque, USA. [Online]. Available: <https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/1987/870804.pdf>.
- [4] N. Ahumada and E. Andres, “Desarrollo de una herramienta computacional para el dimensionamiento adecuado de sistemas fotovoltaicos de bombeo aplicados a riego,” 2018.
- [5] F. Marcuzzi, “Sistemas de bombeo solar (tipos de bombas solares y dimensionamiento) - Webinario Enertik - YouTube,” 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=ZY9cDRuqWkA&t=1694s> (accessed Jul. 15, 2020).
- [6] J. Carrazon, “Manual practico para el diseño de sistemas de minirriego,” Honduras, 2007.
- [7] J. Sánchez San Román, “Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves,” pp. 3–5, 2006, [Online]. Available: <http://hidrologia.usal.xn-espg-7na.1>.
- [8] L. Agudelo and V. Pino, “Diseño de la red de distribución de un mini-distrito de riego para los corregimientos La Palma y Tres Puertas, municipio de Restrepo (Valle del Cauca),” *Mirage*, p. 94, 2015, [Online]. Available: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/xmlui/handle/10893/7775>.
- [9] H. R. Barriga, “Grandes sistemas fotovoltaics de bombeo de agua,” Universidad Politecnica de Madrid.
- [10] I. Mossande, Anaclides; Brown, Oscar; Mujica, Albi; Mata, Carlos; Osorio, “Riego por goteo con energía solar para el tomate en Cavaco, Benguela, Angola.” [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2071-00542015000200002](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542015000200002) (accessed Jul. 09, 2020).
- [11] E. Cervantes, “El Valle del Juárez: su historia, economía y ambiente para el uso de energía fotovoltaica.” <http://bva.colech.edu.mx/xmlui/bitstream/handle/1/1666/valledejuarez.pdf?sequence=1#page=115> (accessed Jul. 09, 2020).

- [12] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, “Resultados de las evaluaciones agropecuarias municipales del año 2015 del producto cítricos,” p. 4, 2015, [Online]. Available: <http://www.agronet.gov.co/Documents/Cítricos.pdf>.
- [13] A. M. de G.- Santander, “Economía.” <http://www.giron-santander.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Economia.aspx> (accessed Jul. 14, 2020).
- [14] C. E. SLU, “Cambio Energetico,” 2019. [www.cambioenergetico.com/196-kit-de-bombeo-solar-lorentz](http://www.cambioenergetico.com/196-kit-de-bombeo-solar-lorentz).
- [15] “Data | Electricity | ATB | NREL.” <https://atb.nrel.gov/electricity/2020/data.php> (accessed Jul. 20, 2020).

# **ANEXOS**

# ANEXO 1.-DATOS TÉCNICOS DE LOS PANALES CANADIAN SOLAR





\*Black frame product can be provided upon request.

## SUPERPOWER

### CS6K-300 | 305 | 310 | 315MS

Canadian Solar's new SuperPower modules with Mono-PERC cells significantly improve efficiency and reliability. The innovative technology offers superior low irradiance performance in the morning, in the evening and on cloudy days, increasing the energy output of the module and the overall yield of the solar system.

**25 years** linear power output warranty

**10 years** product warranty on materials and workmanship

**MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES\***

ISO 9001:2015 / Quality management system  
 ISO 14001:2015 / Standards for environmental management system  
 OHSAS 18001:2007 / International standards for occupational health & safety

**PRODUCT CERTIFICATES\***

IEC 61215 / IEC 61730: VDE / CE / MCS / CEC AU / INMETRO  
 UL 1703 / IEC 61215 performance: CEC listed (US) / PSBC (US Florida)  
 UL 1703: CSA / IEC 61701 ED2: VDE / IEC 62716: VDE  
 UNE 9177 Reaction to Fire: Class 1  
 IEC60068-2-68:SGS  
 Take-e-way

**KEY FEATURES**

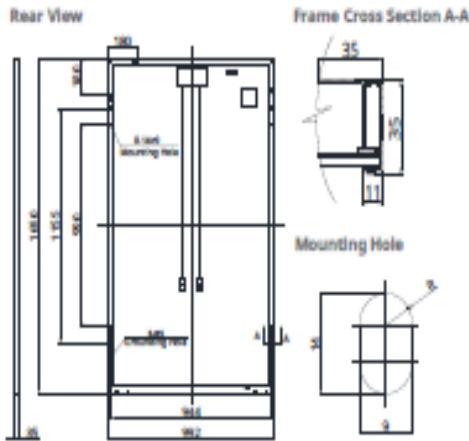
-  11 % more power than conventional modules
-  High PTC rating of up to: 91.90 %
-  Improved energy production due to low temperature coefficients
-  IP68 junction box for long-term weather endurance
-  Heavy snow load up to 6000 Pa, wind load up to 4000 Pa \*

**CANADIAN SOLAR INC.** is committed to providing high quality solar products, solar system solutions and services to customers around the world. No. 1 module supplier for quality and performance/price ratio in IHS Module Customer Insight Survey. As a leading PV project developer and manufacturer of solar modules with over 30 GW deployed around the world since 2001.

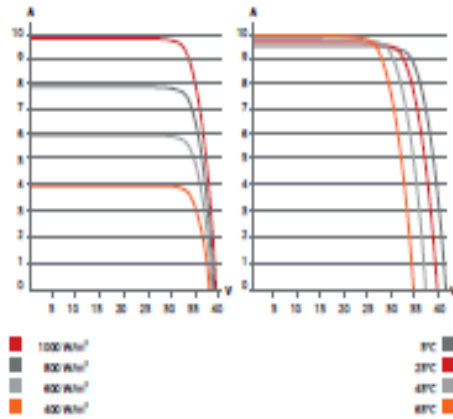
\*For detail information, please refer to Installation Manual.

**CANADIAN SOLAR INC.**  
 545 Speedvale Avenue West, Guelph, Ontario N1K 1E6, Canada, [www.canadiansolar.com](http://www.canadiansolar.com), [support@canadiansolar.com](mailto:support@canadiansolar.com)

## ENGINEERING DRAWING (mm)



## CS6K-305MS / I-V CURVES



## ELECTRICAL DATA | STC\*

| CS6K                                      | 300MS                                   | 305MS  | 310MS  | 315MS   |
|---|---|--------|--------|---------|
| Nominal Max. Power (P <sub>max</sub> )    | 300 W                                   | 305 W  | 310 W  | 315 W   |
| Opt. Operating Voltage (V <sub>mp</sub> ) | 32.5 V                                  | 32.7 V | 32.9 V | 33.1 V  |
| Opt. Operating Current (I <sub>mp</sub> ) | 9.24 A                                  | 9.33 A | 9.43 A | 9.52 A  |
| Open Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )   | 39.7 V                                  | 39.9 V | 40.1 V | 40.3 V  |
| Short Circuit Current (I <sub>sc</sub> )  | 9.83 A                                  | 9.91 A | 9.99 A | 10.07 A |
| Module Efficiency                         | 18.33%                                  | 18.63% | 18.94% | 19.24%  |
| Operating Temperature                     | -40°C ~ +85°C                           |        |        |         |
| Max. System Voltage                       | 1000 V (IEC/UL) or 1500 V (IEC/UL)      |        |        |         |
| Module Fire Performance                   | TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730) |        |        |         |
| Max. Series Fuse Rating                   | 15 A                                    |        |        |         |
| Application Classification                | Class A                                 |        |        |         |
| Power Tolerance                           | 0 ~ +5 W                                |        |        |         |

\* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

## ELECTRICAL DATA | NMOT\*

| CS6K                                      | 300MS  | 305MS  | 310MS  | 315MS  |
|---|--------|--------|--------|--------|
| Nominal Max. Power (P <sub>max</sub> )    | 222 W  | 226 W  | 230 W  | 233 W  |
| Opt. Operating Voltage (V <sub>mp</sub> ) | 30.0 V | 30.2 V | 30.4 V | 30.6 V |
| Opt. Operating Current (I <sub>mp</sub> ) | 7.40 A | 7.48 A | 7.55 A | 7.63 A |
| Open Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )   | 37.2 V | 37.4 V | 37.6 V | 37.8 V |
| Short Circuit Current (I <sub>sc</sub> )  | 7.93 A | 7.99 A | 8.06 A | 8.12 A |

\* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m², spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

## PERFORMANCE AT LOW IRRADIANCE

Excellent performance at low irradiance, with an average relative efficiency of 97.5 % for irradiances between 200 W/m² and 1000 W/m² (AM 1.5, 25°C).

\* The specifications and key features contained in this datasheet may deviate slightly from our actual products due to the on-going innovation and product enhancement. Canadian Solar Inc. reserves the right to make necessary adjustment to the information described herein at any time without further notice.

## MECHANICAL DATA

| Specification          | Data  |
|------------------------|---|
| Cell Type              | Mono-crystalline, 6 inch                      |
| Cell Arrangement       | 60 (6 × 10)                                   |
| Dimensions             | 1650 × 992 × 35 mm (65.0 × 39.1 × 1.38 in)    |
| Weight                 | 18.2 kg (40.1 lbs)                            |
| Front Cover            | 3.2 mm tempered glass                         |
| Frame Material         | Anodized aluminium alloy                      |
| J-Box                  | IP68, 3 diodes                                |
| Cable                  | 4.0 mm² (IEC), 12 AWG (UL), 1000 mm (39.4 in) |
| Connector              | T4 series                                     |
| Per Pallet             | 30 pieces                                     |
| Per Container (40' HQ) | 840 pieces                                    |

## TEMPERATURE CHARACTERISTICS

| Specification                               | Data         |
|---|--------------|
| Temperature Coefficient (P <sub>max</sub> ) | -0.39 % / °C |
| Temperature Coefficient (V <sub>oc</sub> )  | -0.29 % / °C |
| Temperature Coefficient (I <sub>sc</sub> )  | 0.05 % / °C  |
| Nominal Module Operating Temperature (NMOT) | 42 ± 3 °C    |

## PARTNER SECTION



## CANADIAN SOLAR INC.

545 Speedvale Avenue West, Guelph, Ontario N1K 1E6, Canada, [www.canadiansolar.com](http://www.canadiansolar.com), [support@canadiansolar.com](mailto:support@canadiansolar.com)



## PS1800 C-SJ5-12

Sistema de bomba inmersa para pozos de 4"

### Aplicaciones

- Abastecimiento de agua potable
- Gestión del depósito de agua
- Irrigación
- Bebedero para ganado
- Sistemas de compresión

### Características

- Instalación rápida, libre de fallos
- Excelente funcionalidad
- Alta confiabilidad y vida útil
- Ciclo corto del retorno de inversión (ROI)
- Costo total más bajo de operación (TCO)

### Datos técnicos

|                  |                            |
|------------------|----------------------------|
| Altura dinámica  | max. 70 m                  |
| Flujo            | max. 7,6 m <sup>3</sup> /h |
| V <sub>imp</sub> | > 102 V                    |
| V <sub>oc</sub>  | max. 200 V                 |

### Normas

**CE** 2006/42/EC, 2004/108/EC, 2006/95/EC

El logo refleja la aprobación que ha sido garantizada para este producto familiar. Los productos son ordenados con la aprobaciones específicas que el mercado requiere.



### Componentes

#### Controlador: PS1800

- Controlar y supervisar
- Entradas de control para protección contra operación en seco, control remoto, etc.
- Protección contra polaridad reversa, sobre carga y temperatura excesiva
- MPPT Integrado
- Desconexión por bajo voltaje en modo operación con batería

#### Motor: ECDRIVE 1200-C

- Motor CD sin escobillas - libre de mantenimiento
- Llenada de agua
- Sin elementos electrónicos en el motor
- Inmersión max. 250 m, IP68

#### Cabeza de bomba: PE C-SJ5-12

- Alta confiabilidad y vida útil
- Válvula no retorno
- Materiales Premium
- Opcional: protección contra operación en seco

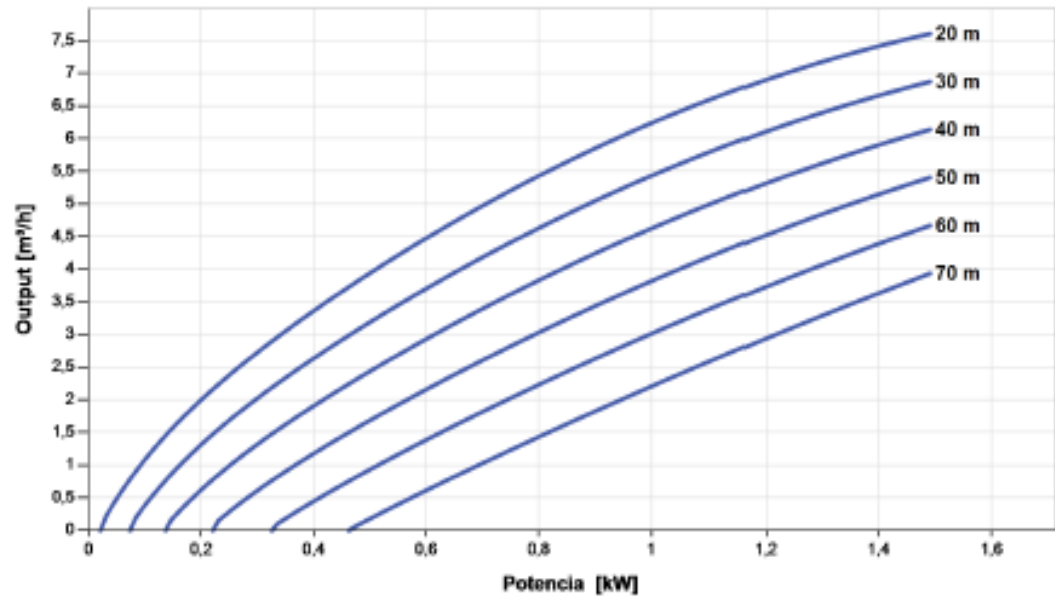


# PS1800 C-SJ5-12

Sistema de bomba inmersa para pozos de 4"

## Plantilla de datos de la bomba

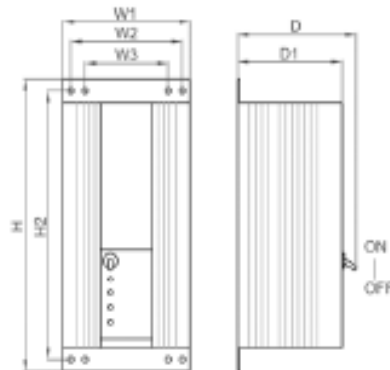
Vmp\* > 102 V



## Dimensiones y pesos

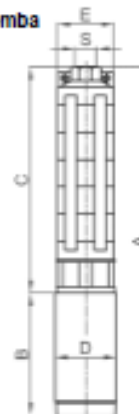
### Controlador

- H = 396 mm
- H2 = 364 mm
- W1 = 178 mm
- W2 = 156 mm
- W3 = 116 mm
- D = 165 mm
- D1 = 150 mm



### Undidad de bomba

- A = 611 mm
- B = 185 mm
- C = 426 mm
- D = 96 mm
- E = 98 mm
- S = 1,5 in



|                  | Peso neto |
|------------------|-----------|
| Controlador      | 4,5 kg    |
| Undidad de bomba | 14 kg     |
| Motor            | 7,0 kg    |
| Cabeza de bomba  | 6,5 kg    |

\*Vmp: Voltaje máximo de carga bajo STC

## 3 ORDEN DE CABLEADO PARA UNA ROTACIÓN CORRECTA

Los cables de corriente de la bomba tienen una marca para facilitar el cableado correcto. Conecte los cables de corriente siguiendo esta secuencia:

- L1
- L2
- L3
- Conexión a tierra



**No debe haber interruptores de desconexión instalados entre el motor y el controlador de la bomba.** Conectar el cable del motor en un controlador conectado puede dañarlos de forma irreparable. Dichos daños quedan excluidos de la garantía.



**¡PRECAUCIÓN!** Cuando realice las uniones del cable de la bomba, tome nota atentamente de las marcas de los cables que ha conectado.

**Comprobar la dirección de la bomba** Las bombas de tornillo excéntrico harán fluir el agua solamente si están rotando en la dirección correcta. Colocándolo en un depósito de agua o en un cubo podrá comprobar el flujo si la rotación es correcta. Sumerja al menos un 75 % para observar un flujo completo.

**O bien, realice una prueba en seco** Si no dispone de un recipiente de agua en el que comprobar la bomba, puede comprobarla en seco observando el eje de la bomba y haciéndola funcionar durante unos segundos. La etiqueta metálica de la bomba tiene una flecha para indicar la dirección correcta de rotación. Puede hacerse funcionar en seco de forma segura durante 15 segundos. Esto proporciona tiempo más que suficiente para observar la dirección del eje.

Si no ha apuntado la concordancia de colores, conecte los tres cables de corriente del controlador de forma aleatoria. Activar la corriente. Observe la rotación del eje de la bomba; a continuación, apague la corriente. Si la dirección es incorrecta, intercambie cualquiera de los dos cables de corriente del controlador. Cuando haya finalizado la conexión de la bomba al controlador, compruébela para garantizar la dirección correcta.

**¿Ha instalado la bomba en el pozo sin comprobar el orden de cableado o la dirección?**

**O: ¿está funcionando pero no bombea?**

**Bomba de TORNILLO EXCÉNTRICO (sin "C" en el número de modelo)** Encienda la bomba. Observe si hay aire saliendo de la tubería. Si no es así, intente cualquiera de los dos cables del motor y vuelva a observar. Si no puede observar si sale aire, elija la dirección que sea más silenciosa (con menos vibración). Existe un riesgo de daños por funcionamiento en seco si funciona durante demasiado tiempo en dirección invertida. Si la bomba es nueva de fábrica, está lubricada de forma que puede funcionar en seco hasta 90 segundos sin riesgo. Si la bomba ha sido utilizada, no deberá utilizarse durante más de 15 segundos. En muchos casos, una bomba que funciona en sentido inverso se apagará debido a sobrecarga.

**Bomba CENTRÍFUGA (con "C" en el número de modelo)** En sentido inverso, no producirá ningún flujo (o muy bajo). Esto no causará daños en la bomba. Si el flujo no es normal, invierta cualquiera de los dos cables del motor.

**Pregunta** El eje del motor es difícil de girar a mano y se mueve a trompicones. ¿Es normal?

**Respuesta** Sí. Esto está causado por los imanes permanentes del motor. Resulta especialmente difícil de girar cuando está conectado al controlador o si los cables de la bomba están conectados juntos.



**¡ADVERTENCIA!** Si los cables de la bomba están en un orden incorrecto, el motor funcionará en sentido inverso y la bomba no funcionará. Esto puede ocasionar daños. Compruebe la dirección ANTES de instalar la bomba. La dirección correcta es EN SENTIDO CONTRARIO AL DE LAS AGUJAS DEL RELOJ cuando se observa desde arriba.



**¡ADVERTENCIA!** Cuando compruebe la dirección, no haga funcionar la bomba en seco durante más de 15 segundos.

## 4 SISTEMAS CON BATERÍAS

**Los sistemas de bomba LORENTZ PS pueden funcionar con baterías.** Instale el cable de acoplamiento entre los terminales 6 y 7 para conmutar el controlador al modo de baterías. Esto desactivará la función de seguimiento MPP y activará la función de desconexión por tensión insuficiente.

**Cableado** Conecte la batería directamente al controlador LORENTZ PS y NO a los terminales de carga del cargador. Puede que no sean lo suficientemente fuertes para proporcionar el pico de carga durante el arranque de la bomba. El controlador LORENTZ PS cuenta con una función de desconexión por tensión insuficiente para proteger la batería contra el exceso de descarga.

Algunos controladores de carga supervisan la capacidad de la batería y regulan la carga en consecuencia. Esto no funciona cuando la batería está conectada al controlador LORENTZ PS. Para poder proporcionar la carga correcta, el cargador deberá ajustarse a la regulación orientada a la tensión. Esto puede requerir la instalación de una conexión en puente en el cargador. Consulte los manuales del fabricante del cargador.

**Protección contra sobrecarga** Instale un fusible o un cortocircuitador cerca de la fuente de alimentación. Tanto para 24V como para 48V, utilice un cortocircuitador de 25A (sistemas PS200 o PS600) o un fusible de acción retardada (fusible lento). El propósito de esta protección es la seguridad en caso de fallo del cableado y proporcionar un medio para la desconexión cuando se instala o se realiza el mantenimiento del sistema. Los controladores LORENTZ PS disponen de una protección de sobrecorriente electrónica contra la sobrecarga del motor.

**Dimensionamiento del cable para el circuito de CC** El cable debe tener una dimensión de no más del 5 % de caída de tensión a 20A (arranque). Consulte la tabla de dimensionamiento de los cables para 24V o 48V o siga estos ejemplos:

|                     |   |
|---------------------|---|
| <b>24 SISTEMA V</b> | #10 conecta a una distancia máxima de 30 pies<br>Métrica: 6mm <sup>2</sup> a máximo 10m |
| <b>48 SISTEMA V</b> | #12 conecta a una distancia máxima de 22 pies<br>Métrica: 4mm <sup>2</sup> a máximo 13m |

**Longitudes superiores** Por cada aumento del 150% en longitud, utilice el siguiente tamaño de cable más grande.

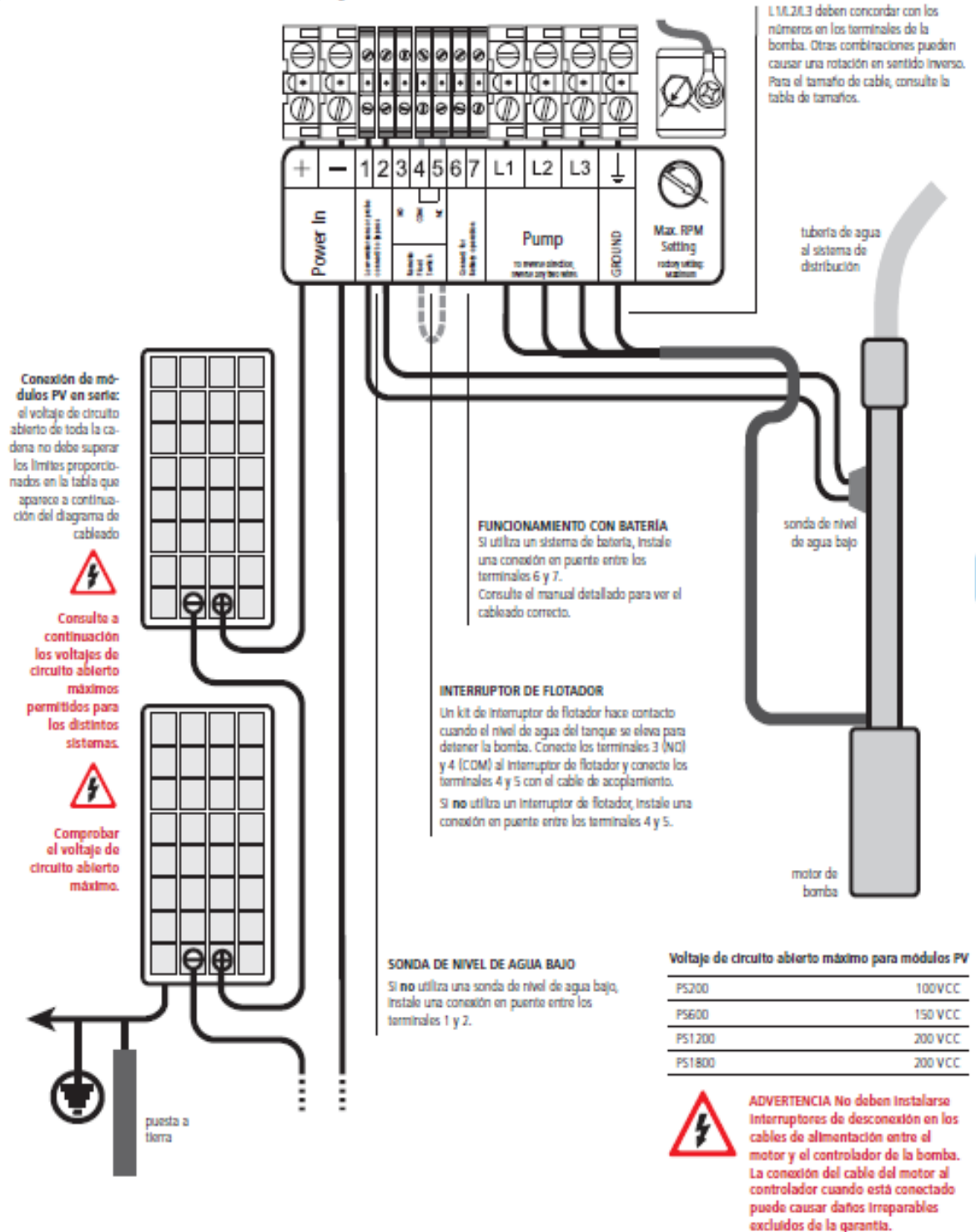
**Conmutación entre APAGADO/ENCENDIDO** Puede conmutar entre la fuente de energía primaria del controlador o el circuito de control remoto (Interruptor flotante).

**Función de desconexión por tensión insuficiente** Las baterías de ácido-plomo pueden dañarse permanentemente por una descarga excesiva cuando la tensión cae por debajo de un punto crítico. Para evitar esto, el controlador del sistema de batería de PS se apagará en caso de baja tensión y no volverá a encenderse hasta que no se haya recuperado significativamente la batería.

Los puntos de ajuste son:

| Sistema | APAGADO | ENCENDIDO |
|---------|---------|-----------|
| 24VCC   | 22VCC   | 24VCC     |
| 48VCC   | 44VCC   | 48VCC     |

## 7.2 PS600, PS 1200, PS1800: funcionamiento con energía solar directa





# PS2-1800 C-SJ8-7

## Solar Submersible Pump System for 4" wells

### System Overview

|           |                           |
|-----------|---------------------------|
| Head      | max. 40 m                 |
| Flow rate | max. 13 m <sup>3</sup> /h |

### Technical Data

#### Controller PS2-1800

- Controlling and monitoring
- Control inputs for dry running protection, remote control etc.
- Protected against reverse polarity, overload and overtemperature
- Integrated MPPT (Maximum Power Point Tracking)
- Battery operation: Integrated low voltage disconnect
- Integrated Sun Sensor

|                 |             |
|-----------------|-------------|
| Power           | max. 1,8 kW |
| Input voltage   | max. 200 V  |
| Optimum Vmp**   | > 102 V     |
| Motor current   | max. 14 A   |
| Efficiency      | max. 98 %   |
| Ambient temp.   | -40...50 °C |
| Enclosure class | IP68        |

#### Motor ECDRIVE 1200-C / ECDRIVE 1800-C

- Maintenance-free brushless DC motor
- Water filled
- Premium materials, stainless steel: AISI 304/316
- No electronics in the motor

|                  |                 |
|------------------|-----------------|
| Rated power      | 1,7 kW          |
| Efficiency       | max. 92 %       |
| Motor speed      | 900...3 300 rpm |
| Insulation class | F               |
| Enclosure class  | IP68            |
| Submersion       | max. 150 m      |

#### Pump End PE C-SJ8-7

- Non-return valve
- Premium materials, stainless steel: AISI 304
- Optional: dry running protection
- Centrifugal pump



#### Pump Unit PU1800 C-SJ8-7 (Motor, Pump End)

|                   |             |
|-------------------|-------------|
| Borehole diameter | min. 4.0 in |
| Water temperature | max. 50 °C  |

### Standards



2006/42/EC, 2004/108/EC, 2006/95/EC

IEC/EN 61702:1995

The logos shown reflect the approvals that have been granted for this product family. Products are ordered and supplied with the approvals specific to the market requirements.

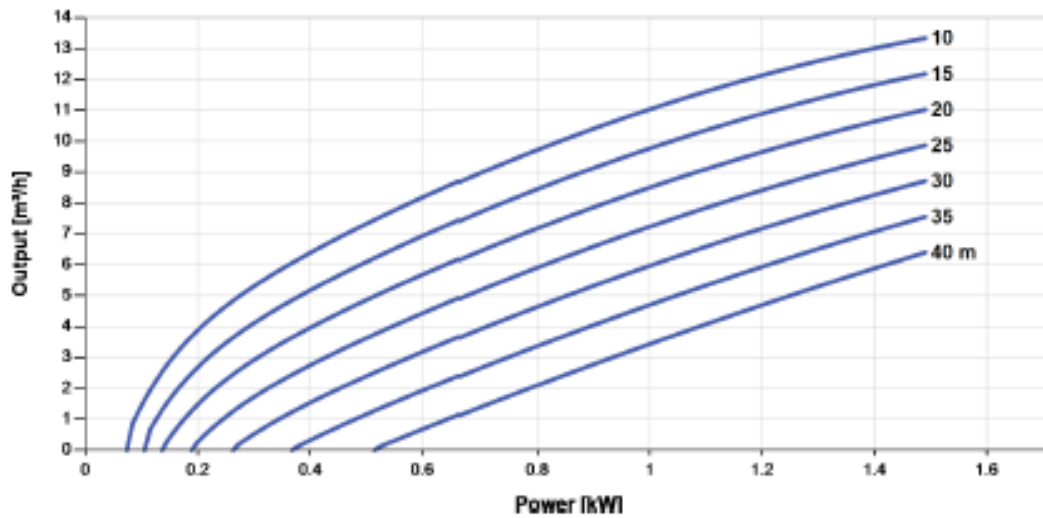
\*\*Vmp: MPP-voltage under Standard Test Conditions (STC): 1000 W/m<sup>2</sup> solar irradiance, 25 °C cell temperature

# PS2-1800 C-SJ8-7

## Solar Submersible Pump System for 4" wells

### Pump Chart

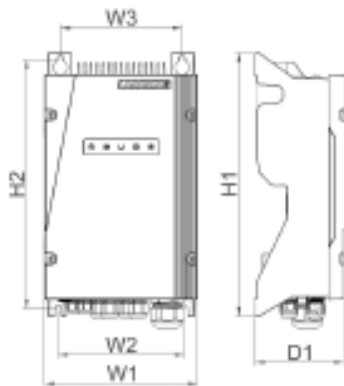
V<sub>mp</sub>\* > 102 V



### Dimensions and Weights

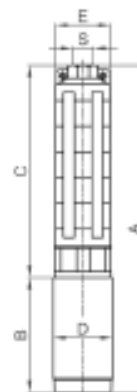
#### Controller

- H1 = 352 mm
- H2 = 333 mm
- W1 = 207 mm
- W2 = 170 mm
- W3 = 164 mm
- D1 = 124 mm



#### Pump Unit


- A = 684 mm
- B = 185 mm
- C = 499 mm
- D = 95 mm
- E = 98 mm
- S = 2 in



|            | Net weight |
|------------|------------|
| Controller | 6,0 kg     |
| Pump Unit  | 14 kg      |
| Motor      | 7,0 kg     |
| Pump End   | 6,5 kg     |

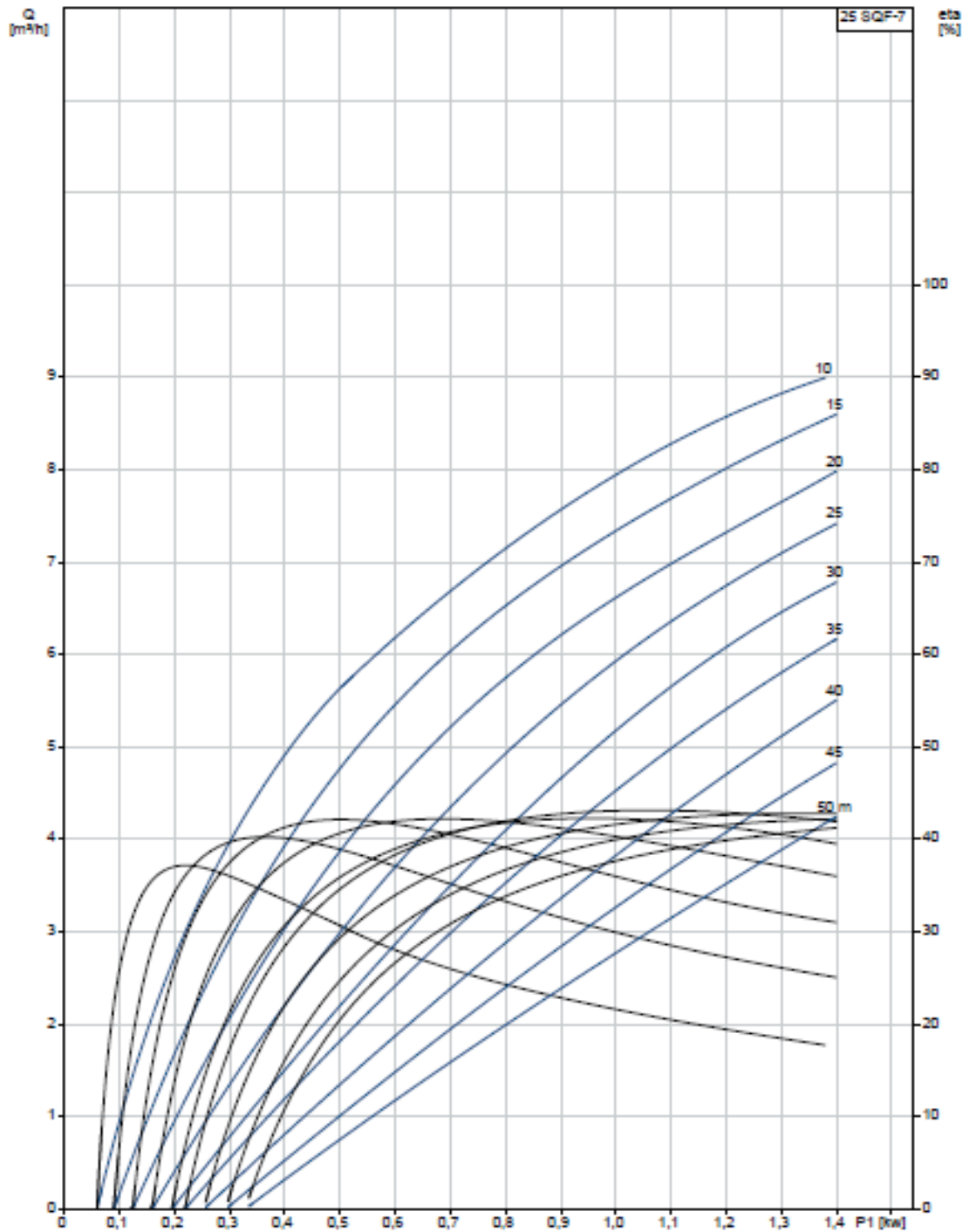
\*V<sub>mp</sub>: MPP-voltage under Standard Test Conditions (STC): 1000 W/m² solar irradiance, 25 °C cell temperature

## ANEXO 4.-DATOS TÉCNICOS BOMBA GRUNDFOS

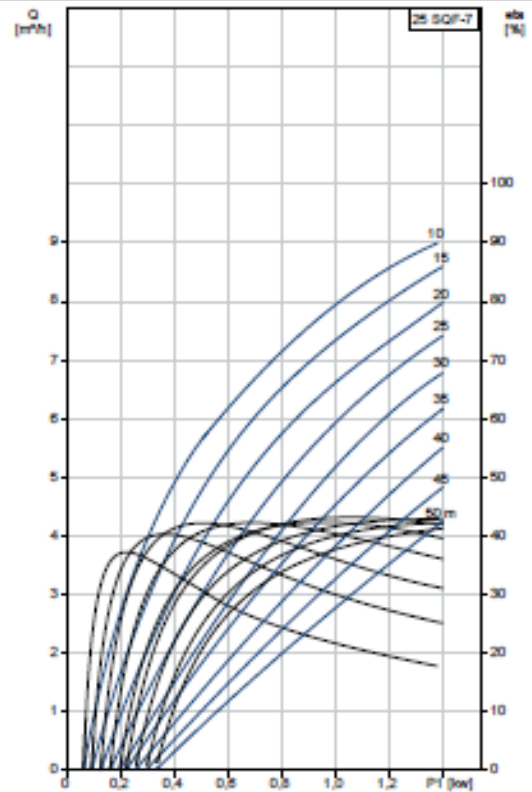
| Contar | Descripción |  |
|--------|-------------|--|
| 1      | 25 SQF-7    | <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: right;"> <p><b>Empresa:</b><br/><b>Creado Por:</b><br/><b>Teléfono:</b></p> <p><b>Datos:</b> 10/06/2020</p> </div> </div> <p style="text-align: center; font-size: small; margin-top: 10px;">Advertencia! la foto puede diferir del actual producto</p> <p><b>Código:</b> 95027353<br/>La bomba centrífuga SQF 4" está indicada para bajas alturas y grandes caudales.</p> <p>El sistema SQFlex es un sistema de suministro de agua fiable basado en fuentes de energía renovables, como energía solar y eólica. Gracias a su suministro flexible de energía y a su rendimiento, el sistema SQFlex se puede combinar y adaptar para satisfacer cualquier necesidad del lugar de instalación.</p> <p>El sistema SQFlex tiene una amplia gama de tensión, seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), así como protección contra funcionamiento en seco, tensión y sobrecarga.</p> <p><b>Líquido:</b><br/>Líquido bombeado: Agua<br/>Temperatura máxima del líquido: 40 °C<br/>Temperatura del líquido durante el funcionamiento: 20 °C<br/>Densidad: 998.2 kg/m³</p> <p><b>Técnico:</b><br/>Homologaciones en placa de del motor: CE,RCM,EAC<br/>Homologaciones en la placa de la bomba: CE,EAC</p> <p><b>Materiales:</b><br/>Bomba: Acero Inoxidable<br/>DIN W.-Nr. 1.4301<br/>AISI 304<br/>Impulsor: Acero Inoxidable<br/>DIN W.-Nr. 1.4301<br/>AISI 304</p> <p><b>Instalación:</b><br/>Máxima presión ambiental: 15 bar<br/>Salida de bomba: 1 1/2" NPT<br/>Diámetro mínimo de la perforación: 102 mm</p> <p><b>Datos eléctricos:</b><br/>Tipo de motor: MSF3<br/>Potencia de entrada - P1: 1.4 kW<br/>Tensión nominal CA: 1 x 90-240 V<br/>Tensión nominal CC: 30-300 V<br/>Intensidad nominal: 8.4 A<br/>Factor de potencia: 1.0<br/>Velocidad nominal: 3600 rpm<br/>Tipo de arranque: directo<br/>Grado de protección (IEC 34-5): IP68<br/>Clase de aislamiento (IEC 85): F</p> |



**95027353 25 SQF-7**



| Descripción  | Valor   |
|--|---|
| <b>Información general:</b>                        |   |
| Producto::   | 25 SQF-7  |
| Código::   | 95027353  |
| Número EAN::                                       | 5700834760488                                     |
|  | 5700834760488                                     |
| <b>Técnico:</b>                                    |   |
| Etapas:  | 7   |
| Homologaciones en placa de del motor:              | CE,RCM,EAC  |
| Homologaciones en la placa de la bomba:            | CE,EAC  |
| Bomba n.º:   | 95027395  |
| Válvula:   | bomba con válvula de retención integrada          |
| <b>Materiales:</b>                                 |   |
| Bomba:   | Acero inoxidable<br>DIN W.-Nr. 1.4301<br>AISI 304 |
| Impulsor:  | Acero inoxidable<br>DIN W.-Nr. 1.4301<br>AISI 304 |
| Rotor:   | DIN W.-Nr. 1.4301<br>AISI 304                     |
| Estátor:   | DIN W.-Nr. 1.4301<br>AISI 304                     |
| <b>Instalación:</b>                                |   |
| Máxima presión ambiental:                          | 15 bar  |
| Salida de bomba:                                   | 1 1/2" NPT  |
| Diámetro mínimo de la perforación:                 | 102 mm  |
| <b>Líquido:</b>                                    |   |
| Líquido bombeado:                                  | Agua  |
| Temperatura máxima del líquido:                    | 40 °C   |
| Temperatura del líquido durante el funcionamiento: | 20 °C   |
| Densidad:  | 998.2 kg/m³                                       |
| <b>Datos eléctricos:</b>                           |   |
| Tipo de motor:                                     | MBF3  |
| Potencia de entrada - P1:                          | 1.4 kW  |
| Tensión nominal CA:                                | 1 x 90-240 V                                      |
| Tensión nominal CC:                                | 30-300 V  |
| Intensidad nominal:                                | 8.4 A   |
| Factor de potencia:                                | 1.0   |
| Velocidad nominal:                                 | 3600 rpm  |
| Tipo de arranque:                                  | directo   |
| Grado de protección (IEC 34-5):                    | IP68  |
| Clase de aislamiento (IEC 85):                     | F   |
| Protec. de motor:                                  | Y   |
| Protec. térmica:                                   | interior  |
| Longitud de cable:                                 | 2 m   |
| Motor N.º:   | 98163731  |
| Udc:   | 300 V   |
|  | 30 V  |
| <b>Otros:</b>                                      |   |
| Índice de eficiencia mínima, MEI $\alpha$ :        | -,-   |
| Peso neto:   | 9 kg  |
| Peso bruto:  | 10.5 kg   |
| Volumen de transporte:                             | 0.028 m³  |





## ANEXO 5.-DATOS TÉCNICOS BOMBAS IHM

### Motobombas Centrifugas **Caracol Super**

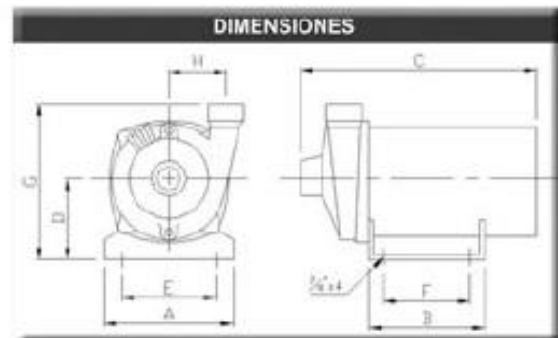
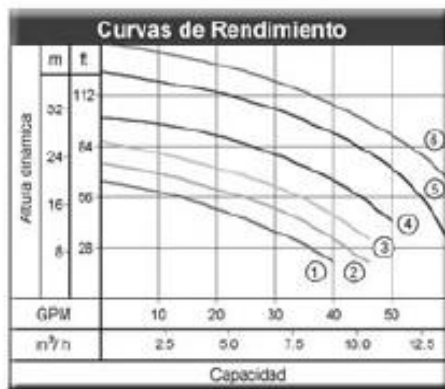
1 1/2" NPT

#### Características de Diseño

- Motobomba centrifuga de acople monoblock, lo que ahorra espacio y facilita la instalación.
- Puede ser montada en posiciones horizontal, vertical, o inclinada.
- Se puede inspeccionar el motor sin retirar la carcasa de las tuberías.
- Carcasa y plato sello construidos en hierro para máxima durabilidad.
- Rotor en Noryl roscado directamente al eje del motor, de diseño cerrado para máxima eficiencia; con inserto en bronce que garantiza mayor durabilidad de éste.
- Carcasa tipo caracol, permite el desmonte por detrás del motor por medio de 4 tornillos. La descarga puede girarse en 4 posiciones diferentes. Posee los tapones de purga convenientemente situados.
- Sello mecánico que garantiza sellado total. Construcción en carbón, cerámica, acero inoxidable y buna N.
- Empaque de neopreno para múltiple reutilización.
- Motor diseñado para operación continua; eje soportado en rodamientos en ambos extremos.

#### Dimensiones y Curvas de Rendimiento

| MODELO     | DIAMETRO<br>Suc X Des (psig) | DIMENSIONES (mm) |     |     |     |     |     |     |    | PESO<br>(kg) | MOTOR      | POTENCIA<br>(HP) | CURVA |
|------------|------------------------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|--------------|------------|------------------|-------|
|            |                              | A                | B   | C   | D   | E   | F   | G   | H  |              |            |                  |       |
| 1A-1/3     | 1 X 1 1/4 NPT                | 170              | 180 | 375 | 120 | 150 | 145 | 240 | 90 | 17.0         | Monofásico | 0.33             | 1     |
| 1A-1/2     | 1 X 1 1/4 NPT                | 170              | 180 | 375 | 120 | 150 | 145 | 240 | 90 | 18.5         | Monofásico | 0.50             | 2     |
| 1A-3/4     | 1 X 1 1/4 NPT                | 170              | 180 | 395 | 120 | 150 | 145 | 240 | 90 | 19.5         | Monofásico | 0.75             | 3     |
| 1 1/2A-1.0 | 1 1/2 X 1 1/2 NPT            | 170              | 180 | 405 | 120 | 150 | 145 | 240 | 90 | 21.5         | Monofásico | 1.00             | 4     |
| 1 1/2A-1.5 | 1 1/2 X 1 1/2 NPT            | 170              | 180 | 405 | 120 | 150 | 145 | 240 | 90 | 24.0         | Monofásico | 1.50             | 5     |
| 1 1/2A-2.0 | 1 1/2 X 1 1/2 NPT            | 170              | 180 | 405 | 120 | 150 | 145 | 240 | 90 | 24.5         | Monofásico | 2.00             | 6     |



CONTACTENOS



Ignacia Gómez **IHM S.A.**

Número Nacional 01 900 331 69 11  
BOGOTÁ - COLOMBIA Calle 13 No. 308-53 - PBX (571) 3 52 69 11 - Fax (571) 3 52 69 35  
www.igihm.com

MOTOBOMBAS CENTRIFUGAS USO GENERAL  
 "CARACOL SUPER"  
 MONOBLOCK ELECTRICAS

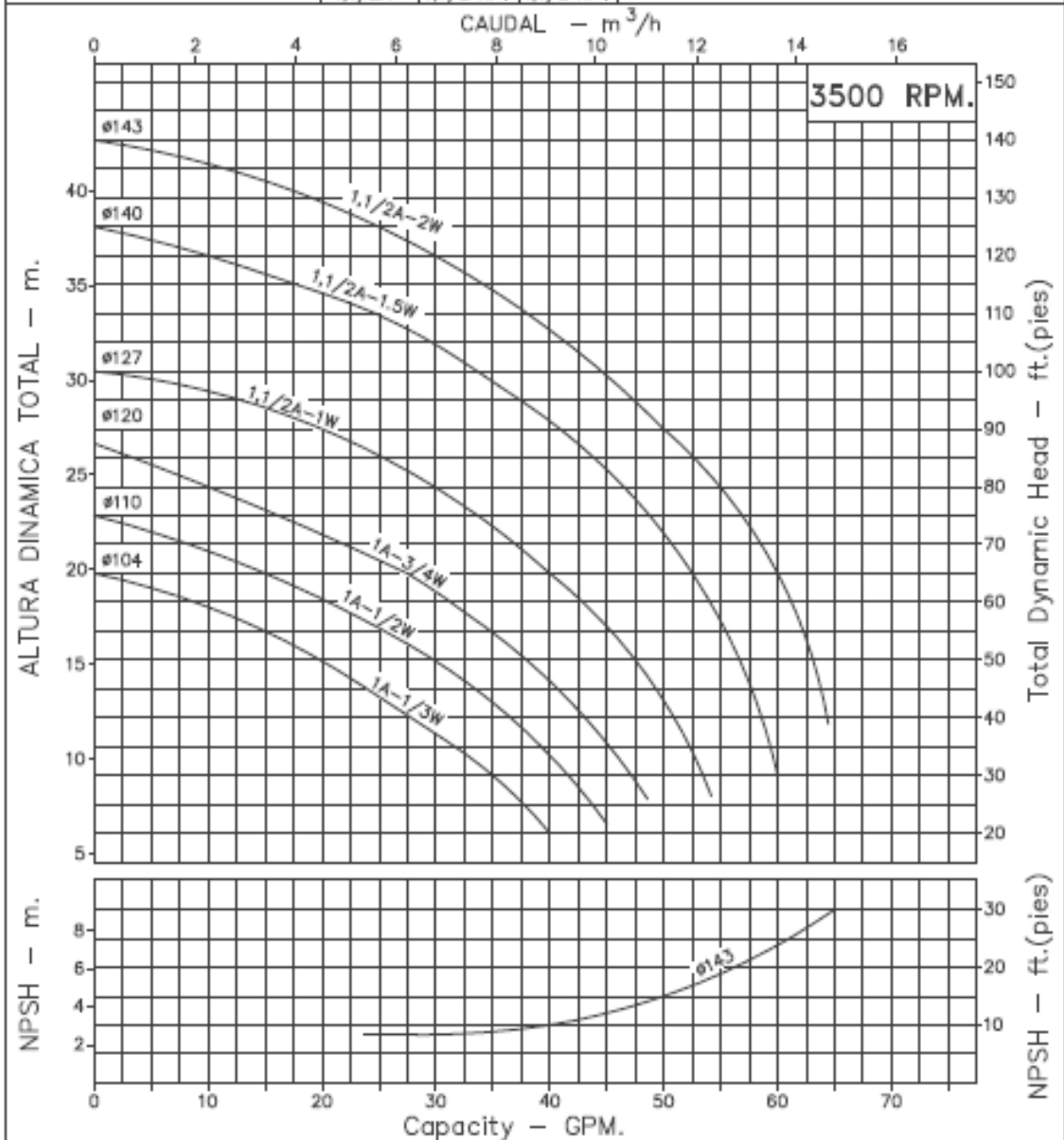


Version: Sello Mecanico.  
 ø Rotor: Variable  
 ø Max. Particulas: 3mm.  
 Motor: Monofasico  
 1/3 a 2 HP.

MODELOS:  
 1A-1/3W ; 1A-1/2W ; 1A-3/4W  
 1,1/2A-1W ; 1,1/2A-1.5W ; 1,1/2A-2W

CONEXION:

| Modelo | Succion   | Descarga  |
|--------|-----------|-----------|
| 1A     | 1,1/4"NPT | 1"NPT     |
| 1,1/2A | 1,1/2"NPT | 1,1/2"NPT |



Codigo: 980040CU  
 Revision: R2  
 Fecha : JUN-06-15  
 Reemp : 950190CU

NOTAS: 1. Densidad del agua a 4 °C : 1 gr/cm<sup>3</sup>  
 2. Curvas desarrolladas a Nivel del Mar

|                 |     |
|-----------------|-----|
| Caudal Max.     | gpm |
| Altura Max.     | ft  |
| Eficiencia Max. | %   |

## ANEXO 6.-DATOS TÉCNICOS BOMBAS BARNES



| Modelo         | Ref.   | Potencia (HP) | Voltaje | H max. (mca) | Q max. (GPM) | Succión | Descarga | Peso (kg) |
|----------------|--------|---------------|---------|--------------|--------------|---------|----------|-----------|
| HE 1.5 20-1    | 1E0506 | 2.0           | 115/230 | 42           | 60           | 1-1/2"  | 1-1/2"   | 27        |
| HE 1.5 20      | 1E0508 | 2.0           | 220/440 | 42           | 60           | 1-1/2"  | 1-1/2"   | 34        |
| HE 1.5 30-1    | 1E0509 | 3.0           | 230     | 53           | 66           | 1-1/2"  | 1-1/2"   | 32        |
| HE 1.5 30-1 CE | 1E0507 | 3.0           | 230     | 53           | 66           | 1-1/2"  | 1-1/2"   | 32        |
| HE 1.5 30      | 1E0509 | 3.0           | 220/440 | 53           | 66           | 1-1/2"  | 1-1/2"   | 35        |

\* La altura (H) máxima se logra con la válvula totalmente cerrada. (mca= metros columna de agua).

\*\*El caudal (Q) máximo se logra con la válvula totalmente abierta. (gpm= galones por minuto).

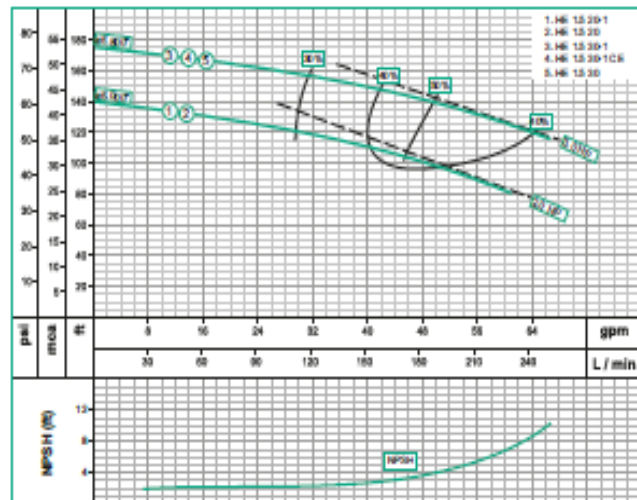


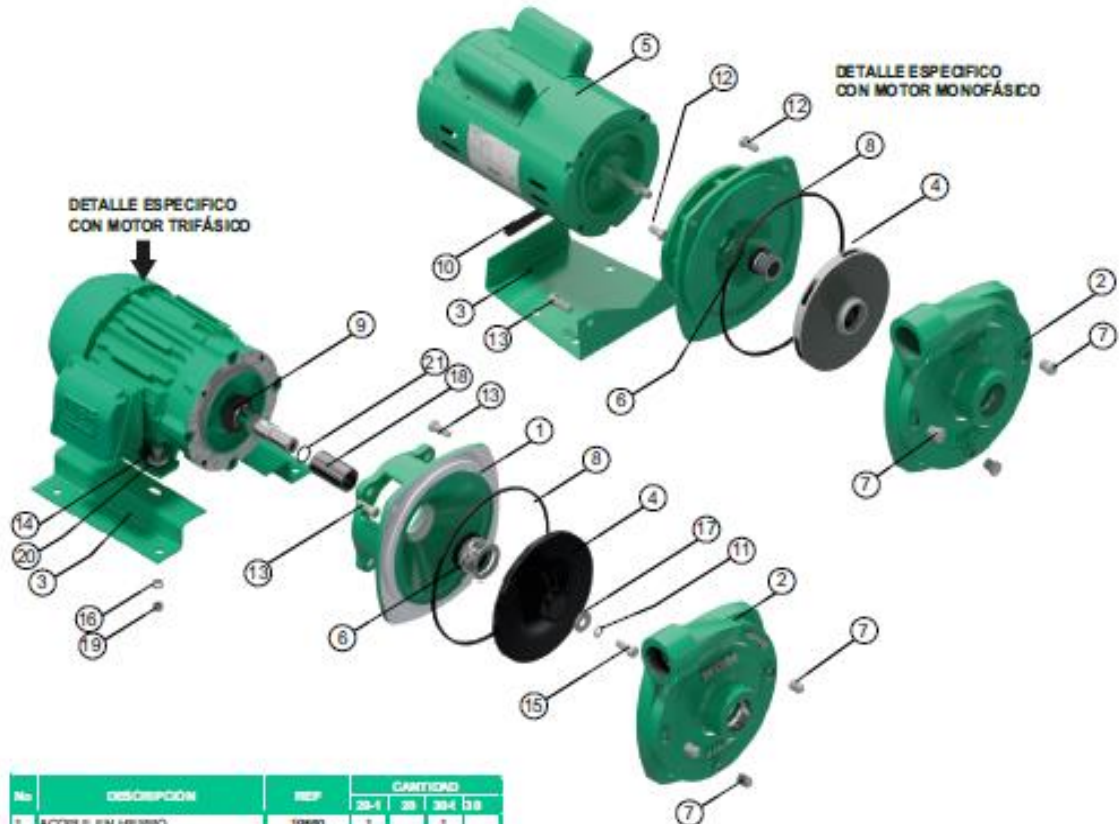
| Materiales        |                                    |
|-------------------|------------------------------------|
| Cuerpo            | Hierro fundido ASTM A-48, Clase 30 |
| Impulsor          | Plástico de Alta Resistencia       |
| Sello mecánico    | Carbón/Cerámica/Buna-N             |
| Acople intermedio | Hierro fundido ASTM A-48, Clase 30 |
| Empaques          | Buna Nitrilo                       |

| Características de la bomba |   |
|-----------------------------|---|
| Tipo de bomba               | Centrífuga  |
| Tipo de acoplamiento        | Monobloque  |
| Succión                     | 1-1/2" NPT  |
| Descarga                    | 1-1/2" NPT  |
| Tipo de impulsor            | Centrado <small>Del anclado directamente según ISO G6,3</small>             |
| Cantidad de impulsores      | 1   |
| Tipo de sello               | Monobloque Sello mecánico SP TPO6<br>Trilobos Sello mecánico 1-1/4" TIPO 21 |
| Temperatura Max. Líquido    | 158° F (70° C) Continua   |

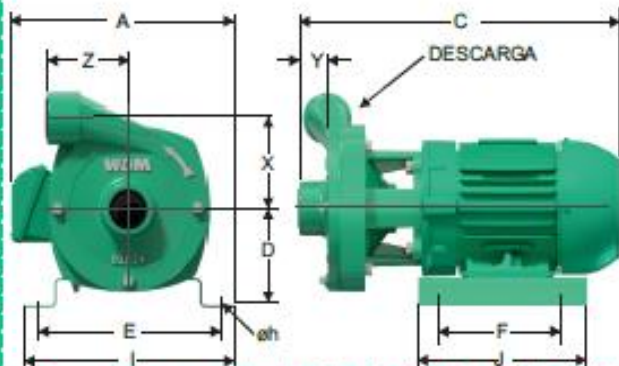
| Características del Motor |                                     |
|---------------------------|-------------------------------------|
| Tipo                      | Eléctrico                           |
| Potencia                  | 2.0 ó 3.0HP (Según modelo)          |
| Diseño                    | Monobloque 56L<br>Trilobos NEMA J41 |
| Velocidad                 | 3.500 RPM (nominal)                 |
| Aislamiento               | Clase F                             |
| Voltaje                   | 220/440                             |
| Factor de servicio        | 1,15                                |
| Frecuencia                | 60Hz                                |
| Fases                     | 1 ó 3 (Según modelo)                |

| Aplicaciones |  |
|--------------|--|
| •            | Aprovisionamiento de aguas limpias                     |
| •            | Recirculación de agua en torres de enfriamiento        |
| •            | Refrigeración de maquinaria/Circuitos de recirculación |
| •            | Sistemas de Presión                                    |
| •            | Equipos contra incendio                                |
| •            | Plantas de tratamiento                                 |
| •            | Riego por goteo  |
| •            | Llenado de tanque bajo y tanque alto                   |





| No | DESCRIPCIÓN                   | REF         | CANTIDAD |    |      |    |
|----|-------------------------------|-------------|----------|----|------|----|
|    |                               |             | 20-1     | 20 | 30-1 | 30 |
| 1  | ACOPLE EN HIERRO              | 19990       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 1  | ACOPLE EN HIERRO              | 19992       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 2  | CUERPO EN HIERRO              | 31423       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 3  | BASE EN LAMINA                | 16203       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 3  | BASE EN LAMINA                | 16345       | 1        | 2  | 2    | 2  |
| 4  | IMPULSOR ø5 000"              | 26930       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 4  | IMPULSOR ø5 800"              | 26990       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 4  | IMPULSOR ø5 000"              | 27630       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 4  | IMPULSOR ø5 800"              | 27690       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 5  | MOTOR 2.0 HP. MONOF.          | 25300       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 5  | MOTOR 2.0 HP. TRIFAS.         | 25000013477 | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 5  | MOTOR 3.0 HP. MONOF.          | 25248       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 5  | MOTOR 3.0 HP. TRIFAS.         | 25000013478 | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 6  | SELLO MECANICO 5/8"           | 03049       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 6  | SELLO MECANICO 1-1/4"         | 03050       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 7  | TAJON 1/8" NPT                | 03199       | 3        | 3  | 3    | 3  |
| 8  | ANILLO CUADRADO               | 27265       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 9  | ARANDELA DE CAUCHO            | 05163       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 10 | SOPOSTE EN CAUCHO             | 30439       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 11 | ARANDELA PRESION DE 3/8" INOX | 02616       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 12 | TORNILLO 3/8"x3/4" NC         | 02195       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 13 | TORNILLO 3/8"x1" NC           | 02037       | 7        | 8  | 7    | 8  |
| 14 | TORNILLO 5/16"x1-1/4" NC      | 02220       | 4        | 4  | 4    | 4  |
| 15 | TORNILLO 3/8"x 1-1/4" INOX    | 02216       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 16 | ARANDELA PRESION DE 5/16"     | 02602       | 4        | 4  | 4    | 4  |
| 17 | ARANDELA DE RETENCION         | 02653       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 18 | CAMISA ENACERO                | 23994       | 1        | 1  | 1    | 1  |
| 19 | TUBICIA DE 5/16"              | 02901       | 4        | 4  | 4    | 4  |
| 20 | ARANDELA 5/16"                | 02652       | 4        | 4  | 4    | 4  |
| 21 | ANILLO *O* 2-020              | 17433       | 1        | 1  | 1    | 1  |



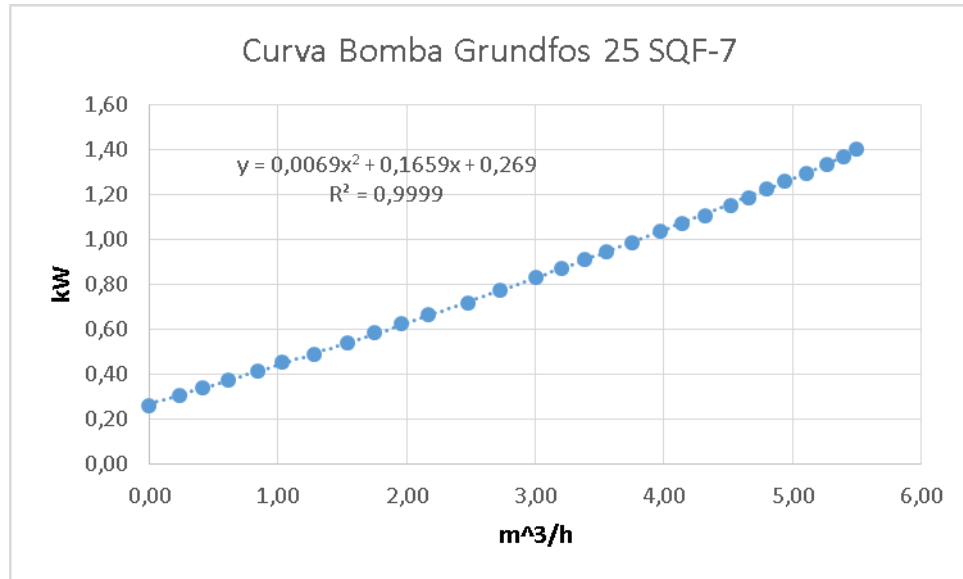
| MODELO      | SUCK/DESC       | C   | A   | D   | E   | F   | J   | I   | X   | Y  | Z   | PEBO |
|-------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|------|
| HE 1.5 20-1 | 1-1/2" x 1-1/2" | 307 | 217 | 130 | 127 | 78  | 100 | 188 | 117 | 38 | 109 | 27Kg |
| HE 1.5 20   | 1-1/2" x 1-1/2" | 430 | 301 | 128 | 246 | 181 | 225 | 284 | 117 | 38 | 109 | 34Kg |
| HE 1.5 30-1 | 1-1/2" x 1-1/2" | 307 | 217 | 130 | 127 | 78  | 100 | 188 | 117 | 38 | 109 | 32Kg |
| HE 1.5 30   | 1-1/2" x 1-1/2" | 430 | 301 | 128 | 246 | 181 | 225 | 284 | 117 | 38 | 109 | 35Kg |

Nota: Las especificaciones técnicas están sujetas a cambio sin previo aviso

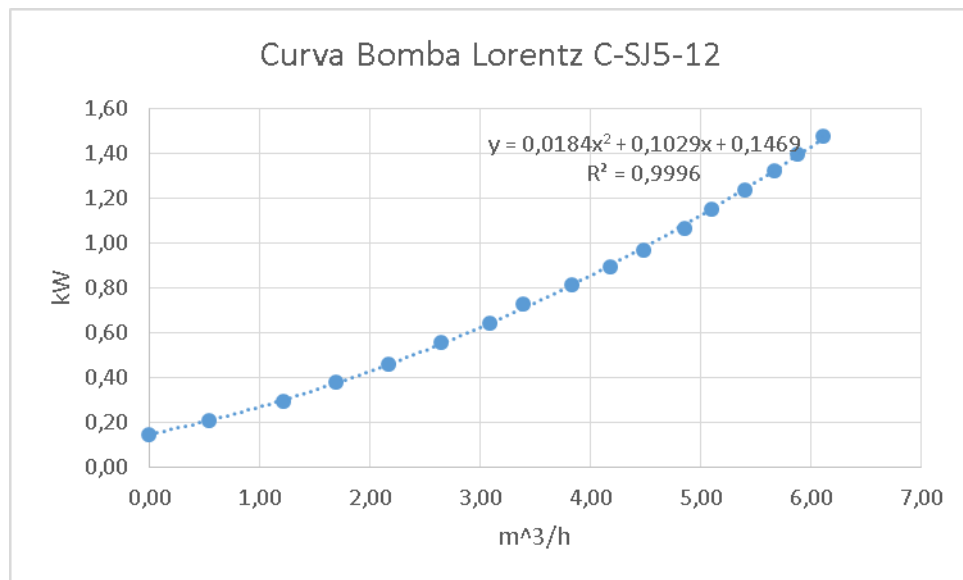
Parque Industrial Celta  
Autopista Bogotá-Medellín Km 7.5 bodega 88 y 90  
Funza - Cundinamarca  
PBX: (57(1) 743 9090  
Aparato Aéreo 12098  
www.barnes.com.co



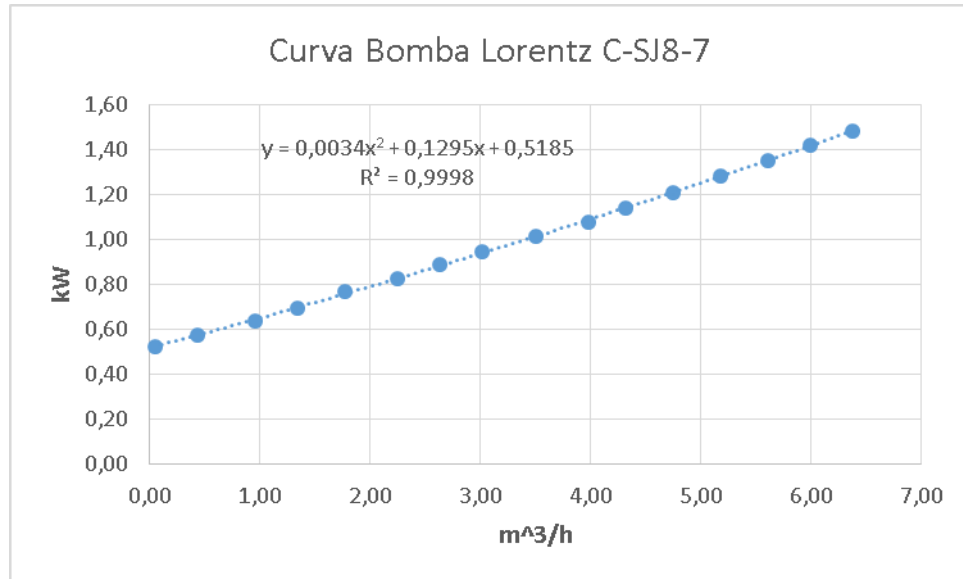
**ANEXO 7.-ECUACIÓN CARACTERÍSTICA DE LA CURVA DE LA BOMBA A 40 M  
GRUNDFOS 25 SQF-7**



**ANEXO 8.- ECUACIÓN CARACTERÍSTICA DE LA CURVA DE LA BOMBA A 40 M  
LORENTZ PS2-1800 C-SJ5-12**



**ANEXO 9.- ECUACIÓN CARACTERÍSTICA DE LA CURVA DE LA BOMBA A 40 M  
LORENTZ PS2-1800 C-SJ8-7**



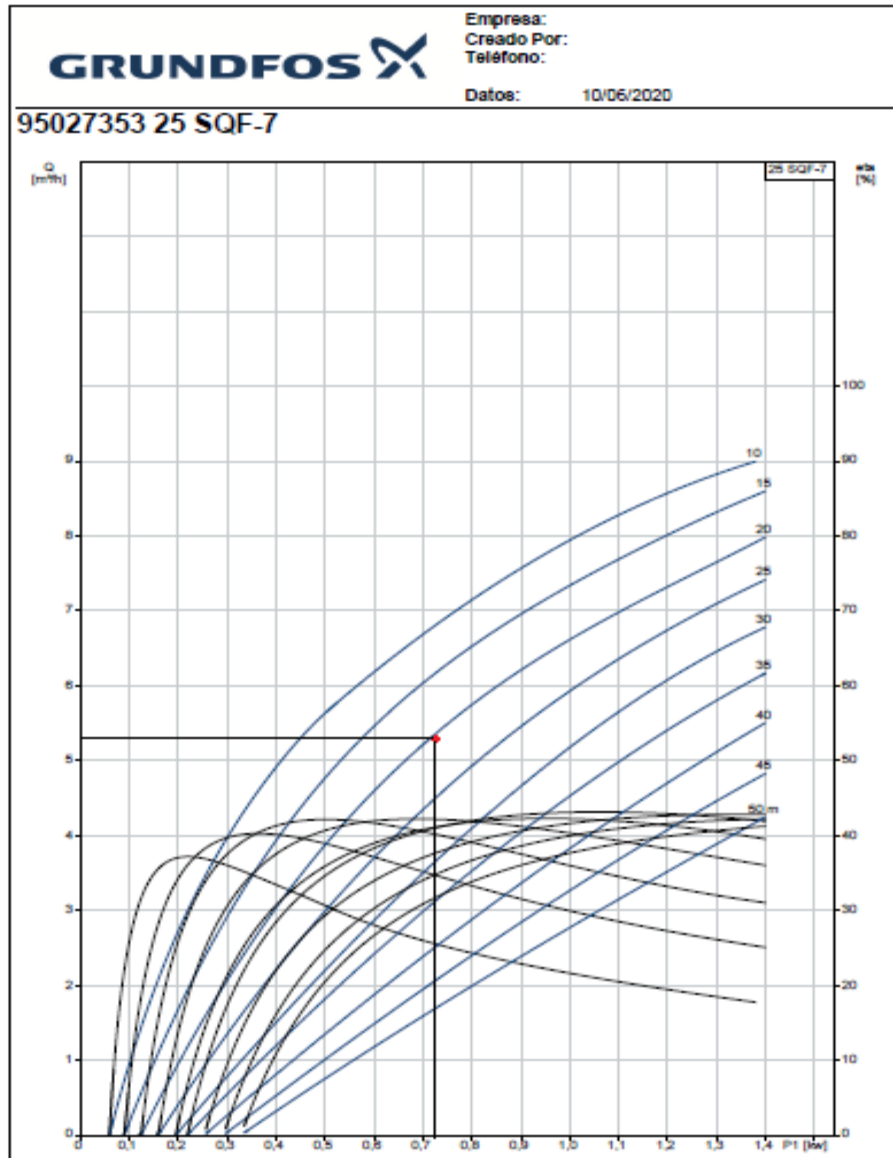


## ANEXO 10.- TABLA DE RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE EN MM/DÍA

**Tabla de Radiación solar extraterrestre en mm/día (Allen et al., 1998)** (Original en MJ-m<sup>2</sup>-día<sup>-1</sup>; 1 mm/día = 2,45 MJ-m<sup>2</sup>-día<sup>-1</sup>)

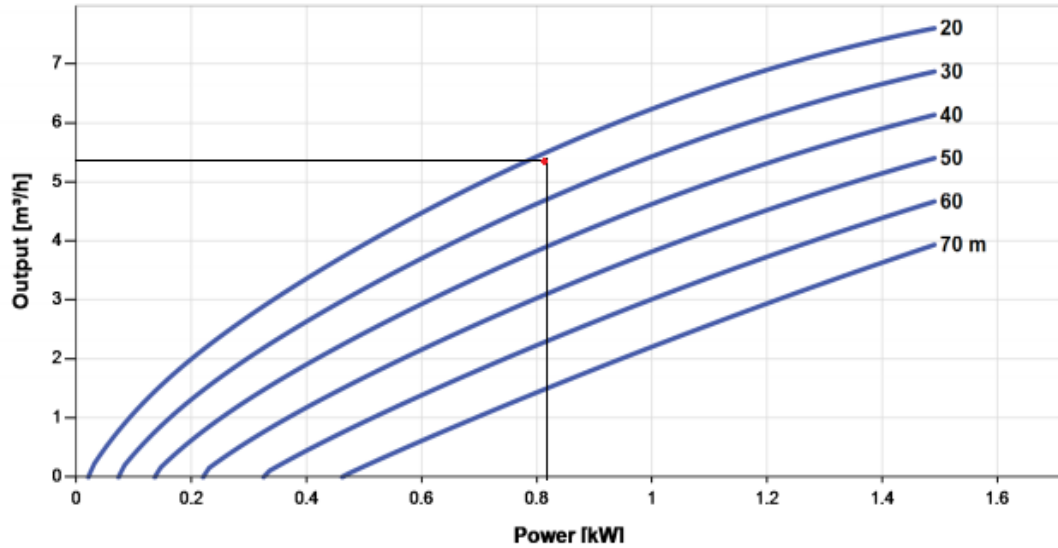
| Latitud | HEMISFERIO NORTE |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | HEMISFERIO SUR |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|         | Ene              | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago  | Sep  | Oct  | Nov  | Dic  | Ene            | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago  | Sep  | Oct  | Nov  | Dic  |
| 70      | 0.0              | 1.1  | 4.2  | 9.4  | 14.4 | 17.3 | 16.1 | 11.4 | 6.1  | 2.0  | 0.0  | 0.0  | 16.9           | 11.7 | 6.4  | 2.0  | 0.1  | 0.0  | 0.0  | 0.9  | 4.4  | 9.6  | 15.2 | 18.5 |
| 68      | 0.0              | 1.5  | 4.8  | 9.8  | 14.4 | 17.1 | 15.9 | 11.7 | 6.6  | 2.4  | 0.3  | 0.0  | 16.7           | 12.0 | 6.9  | 2.4  | 0.3  | 0.0  | 0.0  | 1.3  | 4.9  | 10.0 | 15.3 | 18.2 |
| 66      | 0.2              | 2.0  | 5.3  | 10.1 | 14.5 | 16.9 | 15.8 | 12.0 | 7.1  | 2.9  | 0.6  | 0.0  | 16.7           | 12.2 | 7.4  | 2.9  | 0.6  | 0.0  | 0.2  | 1.7  | 5.3  | 10.4 | 15.3 | 18.0 |
| 64      | 0.6              | 2.4  | 5.8  | 10.5 | 14.7 | 16.8 | 15.8 | 12.2 | 7.5  | 3.5  | 1.0  | 0.2  | 16.7           | 12.6 | 7.9  | 3.4  | 1.0  | 0.2  | 0.5  | 2.2  | 5.9  | 10.7 | 15.5 | 17.9 |
| 62      | 0.9              | 2.9  | 6.3  | 10.9 | 14.8 | 16.8 | 15.9 | 12.5 | 8.0  | 4.0  | 1.4  | 0.5  | 16.8           | 12.9 | 8.3  | 3.9  | 1.4  | 0.5  | 0.8  | 2.6  | 6.3  | 11.1 | 15.6 | 17.9 |
| 60      | 1.3              | 3.4  | 6.8  | 11.2 | 14.9 | 16.8 | 16.0 | 12.8 | 8.4  | 4.4  | 1.8  | 0.9  | 16.9           | 13.2 | 8.8  | 4.4  | 1.8  | 0.8  | 1.2  | 3.1  | 6.8  | 11.5 | 15.8 | 17.9 |
| 58      | 1.8              | 3.9  | 7.2  | 11.6 | 15.1 | 16.9 | 16.1 | 13.1 | 8.9  | 4.9  | 2.2  | 1.3  | 17.0           | 13.5 | 9.2  | 4.9  | 2.2  | 1.2  | 1.6  | 3.6  | 7.3  | 11.8 | 16.0 | 18.0 |
| 56      | 2.2              | 4.4  | 7.7  | 11.9 | 15.3 | 16.9 | 16.2 | 13.3 | 9.3  | 5.4  | 2.7  | 1.7  | 17.1           | 13.8 | 9.6  | 5.4  | 2.7  | 1.6  | 2.0  | 4.0  | 7.8  | 12.2 | 16.1 | 18.0 |
| 54      | 2.7              | 4.9  | 8.2  | 12.2 | 15.4 | 16.9 | 16.2 | 13.6 | 9.7  | 5.9  | 3.2  | 2.1  | 17.2           | 14.0 | 10.0 | 5.9  | 3.1  | 2.0  | 2.4  | 4.5  | 8.2  | 12.5 | 16.3 | 18.1 |
| 52      | 3.1              | 5.4  | 8.6  | 12.6 | 15.6 | 17.0 | 16.4 | 13.8 | 10.1 | 6.4  | 3.7  | 2.6  | 17.3           | 14.3 | 10.4 | 6.4  | 3.6  | 2.4  | 2.9  | 5.0  | 8.7  | 12.8 | 16.4 | 18.1 |
| 50      | 3.6              | 5.9  | 9.1  | 12.9 | 15.7 | 17.0 | 16.4 | 14.0 | 10.5 | 6.9  | 4.2  | 3.1  | 17.4           | 14.5 | 10.9 | 6.8  | 4.1  | 2.9  | 3.3  | 5.5  | 9.1  | 13.1 | 16.6 | 18.2 |
| 48      | 4.1              | 6.4  | 9.5  | 13.1 | 13.8 | 17.1 | 16.5 | 14.2 | 10.9 | 7.4  | 4.7  | 3.6  | 17.5           | 14.8 | 11.2 | 7.3  | 4.5  | 3.3  | 3.8  | 6.0  | 9.5  | 13.4 | 16.7 | 18.2 |
| 46      | 46.1             | 6.9  | 9.9  | 13.4 | 16.0 | 17.1 | 16.6 | 14.4 | 11.2 | 7.8  | 5.1  | 4.0  | 17.6           | 15.0 | 11.6 | 7.8  | 5.0  | 3.8  | 4.2  | 6.4  | 9.9  | 13.7 | 16.8 | 18.2 |
| 44      | 5.1              | 7.3  | 10.3 | 13.7 | 16.0 | 17.1 | 16.6 | 14.7 | 11.6 | 8.3  | 5.7  | 4.5  | 17.6           | 15.2 | 12.0 | 8.2  | 5.5  | 4.3  | 4.7  | 6.9  | 10.3 | 13.9 | 16.9 | 18.2 |
| 42      | 5.6              | 7.8  | 10.7 | 13.9 | 16.1 | 17.1 | 16.7 | 14.8 | 11.9 | 8.7  | 6.2  | 5.1  | 17.7           | 15.4 | 12.3 | 8.7  | 6.0  | 4.7  | 5.2  | 7.3  | 10.7 | 14.2 | 17.0 | 18.2 |
| 40      | 6.1              | 8.3  | 11.1 | 14.2 | 16.2 | 17.1 | 16.7 | 15.0 | 12.2 | 9.2  | 6.7  | 5.6  | 17.7           | 15.6 | 12.6 | 9.1  | 6.4  | 5.2  | 5.7  | 7.8  | 11.1 | 14.4 | 17.1 | 18.2 |
| 38      | 6.6              | 8.8  | 11.5 | 14.4 | 16.3 | 17.1 | 16.7 | 15.1 | 12.5 | 9.6  | 7.1  | 6.0  | 17.7           | 15.7 | 12.9 | 9.5  | 6.9  | 5.7  | 6.2  | 8.2  | 11.4 | 14.6 | 17.1 | 18.2 |
| 36      | 7.1              | 9.2  | 11.8 | 14.6 | 16.3 | 17.0 | 16.7 | 15.3 | 12.9 | 10.0 | 7.6  | 6.6  | 17.7           | 15.9 | 13.2 | 9.9  | 7.4  | 6.2  | 6.6  | 8.7  | 11.8 | 14.8 | 17.1 | 18.1 |
| 34      | 7.6              | 9.7  | 12.2 | 14.7 | 16.3 | 17.0 | 16.7 | 15.3 | 13.1 | 10.4 | 8.1  | 7.1  | 17.7           | 16.0 | 13.5 | 10.3 | 7.8  | 6.6  | 7.1  | 9.1  | 12.1 | 15.0 | 17.1 | 18.1 |
| 32      | 8.1              | 10.1 | 12.5 | 14.5 | 16.3 | 16.9 | 16.6 | 15.5 | 13.4 | 10.9 | 8.6  | 7.6  | 17.7           | 16.1 | 13.8 | 10.7 | 8.3  | 7.1  | 7.6  | 9.5  | 12.4 | 15.1 | 17.1 | 18.0 |
| 30      | 8.6              | 10.5 | 12.8 | 15.0 | 16.3 | 16.8 | 16.6 | 15.5 | 13.6 | 11.3 | 9.1  | 8.1  | 17.6           | 16.2 | 14.0 | 11.1 | 8.7  | 7.6  | 8.0  | 9.9  | 12.7 | 15.3 | 17.1 | 17.9 |
| 28      | 9.1              | 10.9 | 13.1 | 15.1 | 16.3 | 16.7 | 16.5 | 15.6 | 13.8 | 11.6 | 9.5  | 8.6  | 17.6           | 16.2 | 14.2 | 11.5 | 9.2  | 8.0  | 8.4  | 10.3 | 13.0 | 15.4 | 17.1 | 17.8 |
| 26      | 9.6              | 11.3 | 13.4 | 15.3 | 16.3 | 16.6 | 16.4 | 15.6 | 14.1 | 12.0 | 10.0 | 9.1  | 17.5           | 16.3 | 14.4 | 11.8 | 9.6  | 8.5  | 8.9  | 10.7 | 13.3 | 15.5 | 17.1 | 17.7 |
| 24      | 10.0             | 11.8 | 13.7 | 15.3 | 16.2 | 16.4 | 16.3 | 15.6 | 14.2 | 12.3 | 10.4 | 9.5  | 17.3           | 16.3 | 14.6 | 12.2 | 10.0 | 8.9  | 9.3  | 11.1 | 13.5 | 15.6 | 17.0 | 17.6 |
| 22      | 10.5             | 12.1 | 13.9 | 15.4 | 16.1 | 16.3 | 16.2 | 15.7 | 14.4 | 12.7 | 10.9 | 10.0 | 17.2           | 16.4 | 14.8 | 12.5 | 10.4 | 9.4  | 9.8  | 11.5 | 13.8 | 15.7 | 16.9 | 17.4 |
| 20      | 10.9             | 12.5 | 14.2 | 15.5 | 16.0 | 16.1 | 16.0 | 15.6 | 14.6 | 13.0 | 11.3 | 10.4 | 17.1           | 16.3 | 14.9 | 12.8 | 10.9 | 9.8  | 10.2 | 11.8 | 14.0 | 15.8 | 16.8 | 17.2 |
| 18      | 11.4             | 12.9 | 14.4 | 15.5 | 15.9 | 16.0 | 15.9 | 15.6 | 14.7 | 13.3 | 11.7 | 10.9 | 16.9           | 16.3 | 15.1 | 13.1 | 11.2 | 10.2 | 10.6 | 12.2 | 14.2 | 15.8 | 16.7 | 17.0 |
| 16      | 11.8             | 13.2 | 14.6 | 15.6 | 15.8 | 15.8 | 15.7 | 15.6 | 14.9 | 13.6 | 12.1 | 11.4 | 16.8           | 16.3 | 15.2 | 13.4 | 11.6 | 10.7 | 11.0 | 12.5 | 14.4 | 15.8 | 16.6 | 16.8 |
| 14      | 12.2             | 13.5 | 14.7 | 15.6 | 15.7 | 15.6 | 15.6 | 15.5 | 15.0 | 13.8 | 12.5 | 11.8 | 16.6           | 16.2 | 15.3 | 13.6 | 12.0 | 11.1 | 11.4 | 12.8 | 14.5 | 15.8 | 16.4 | 16.6 |
| 12      | 12.6             | 13.8 | 14.9 | 15.5 | 15.5 | 15.3 | 15.3 | 15.4 | 15.1 | 14.1 | 12.9 | 12.2 | 16.4           | 16.2 | 15.4 | 13.9 | 12.3 | 11.5 | 11.8 | 13.1 | 14.7 | 15.8 | 16.2 | 16.3 |
| 10      | 13.0             | 14.1 | 15.1 | 15.5 | 15.3 | 15.1 | 15.1 | 15.3 | 15.1 | 14.3 | 13.2 | 12.7 | 16.1           | 16.0 | 15.4 | 14.1 | 12.7 | 11.9 | 12.2 | 13.4 | 14.8 | 15.7 | 16.0 | 16.1 |
| 8       | 13.4             | 14.4 | 15.2 | 15.4 | 15.1 | 14.8 | 14.9 | 15.2 | 15.2 | 14.5 | 13.6 | 13.1 | 15.9           | 15.9 | 15.5 | 14.3 | 13.0 | 12.2 | 12.5 | 13.6 | 14.9 | 15.7 | 15.8 | 15.8 |
| 6       | 13.8             | 14.6 | 15.3 | 15.3 | 14.9 | 14.6 | 14.7 | 15.1 | 15.2 | 14.7 | 13.9 | 13.4 | 15.6           | 15.8 | 15.5 | 14.5 | 13.3 | 12.6 | 12.9 | 13.9 | 15.0 | 15.6 | 15.6 | 15.5 |
| 4       | 14.1             | 14.9 | 15.3 | 15.3 | 14.7 | 14.3 | 14.4 | 14.9 | 15.2 | 14.9 | 14.2 | 13.8 | 15.3           | 15.6 | 15.5 | 14.7 | 13.6 | 13.0 | 13.2 | 14.1 | 15.1 | 15.5 | 15.3 | 15.2 |
| 2       | 14.4             | 15.1 | 15.4 | 15.1 | 14.4 | 14.0 | 14.1 | 14.7 | 15.2 | 15.1 | 14.5 | 14.2 | 15.1           | 15.5 | 15.5 | 14.9 | 13.9 | 13.3 | 13.5 | 14.4 | 15.1 | 15.4 | 15.1 | 14.9 |
| 0       | 14.8             | 15.3 | 15.5 | 15.0 | 14.2 | 13.6 | 13.8 | 14.6 | 15.2 | 15.3 | 14.8 | 14.5 | 14.8           | 15.3 | 15.5 | 15.0 | 14.2 | 13.6 | 13.8 | 14.6 | 15.2 | 15.3 | 14.8 | 14.5 |

**ANEXO 11.-PUNTO DE FUNCIONAMIENTO Y POTENCIA ELECTICA DE LA BOMBA GRUNDFOS 25 SQF-7 EN EL SISTEMA CHOCOA 17**





**ANEXO 12.- PUNTO DE FUNCIONAMIENTO Y POTENCIA ELÉCTRICA DE LA BOMBA LORENTZ PS2-1800 C-SJ5-12 EN EL SISTEMA CHOCOA 17.**



**ANEXO 13.- PUNTO DE FUNCIONAMIENTO Y POTENCIA ELÉCTRICA DE LA BOMBA LORENTZ PS2-1800 C-SJ8-7 EN EL SISTEMA CHOCOA 17.**

