



ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO, PARA
DISTRITO DE RIEGO EN LLANO GRANDE, GIRÓN

SERGIO ANDRÉS JAIMES CARMONA
JHON SEBASTIAN ALVAREZ ESPARZA

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

2020

ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA
DISTRITO DE RIEGO EN LLANO GRANDE, GIRÓN

SERGIO ANDRÉS JAIMES CARMONA

JHON SEBASTIAN ALVAREZ ESPARZA

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 AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA EN ENERGÍA

BUCARAMANGA, SANTANDER COLOMBIA

2020

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DIRECTOR

FIRMA EVALUADOR

FIRMA EVALUADOR

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia agradezco a Dios por llenarme de sabiduría y positivismo en cada momento complicado de todo este recorrido. A mi familia por siempre estar al tanto de mi y a ayudarme a ser mejor persona, incluso estando físicamente lejos. A mis amigos y compañeros por lo cuáles este proyecto se pudo lograr gracias a que todos aportaron un granito de arena en mi motivación para culminar esta etapa.

Igualmente agradezco a mi compañero de proyecto de grado Jhon Sebastian Alvarez por su esfuerzo, compromiso y responsabilidad con respecto al desarrollo de este trabajo que a los dos nos ayudó a crecer aún más profesionalmente y debido a las circunstancias que se presentaron para la fecha, se realizó un impecable trabajo en equipo. Finalmente doy gracias a nuestro director Yecid Alfonso Muñoz y a nuestro co-director Mario Acero Caballero por su guía, pacencia y aporte cognitivo.

Sergio Andrés Jaimes Carmona

El desarrollo de este proyecto de grado es fundamental en mi crecimiento como persona y profesional. Para iniciar le agradezco a Dios por permitirme realizar este trabajo y por estar siempre pendiente de mi para finalizar esta etapa de mi vida de la cual me siento muy satisfecho. Adicionalmente agradezco a mis padres y mi familia que siempre me han apoyado en todas mis metas para mi propósito de vida. A mi compañero de proyecto Sergio Andrés Jaimes por su compromiso y liderazgo, por las experiencias brindadas y por su paciencia. Finalmente agradezco a nuestro director y co-director por brindarnos sus conocimientos.

Jhon Sebastián Alvarez

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
2. RESUMEN	11
3. ABSTRACT	12
4. OBJETIVOS	13
5. MARCO TEÓRICO	14
5.1. NECESIDADES DE RIEGO.....	14
5.1.1. Radiación Solar Incidente	14
5.1.2. Evapotranspiración Potencial.....	15
5.1.3. Precipitación Efectiva.....	15
5.1.4. Evapotranspiración Del Cultivo	16
5.1.5. Precipitación Confiable O Necesidades Netas De Riego.....	16
5.2. DIMENSIONADO DE SISTEMA HIDRÁULICO	17
5.2.1. Estimaciones De Pérdida De Carga.....	17
5.2.2. Número De Reynolds	18
5.2.3. Ecuación De Darcy-Weisbach.....	18
5.2.4. Npsh Disponible Y Requerido	20
5.2.5. Pérdidas Por Fricción En Accesorios	21
5.2.6. Presión Hidrostática	22
5.3. DIMENSIONADO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA BOMBEO SOLAR	22
5.3.1. Potencia Pico En Paneles	23
5.3.2. Separación Entre Paneles	24
5.3.3. Ángulo Óptimo.....	24
5.3.4. Temperatura Media Del Módulo Fotovoltaico.....	25
6. ESTADO DEL ARTE	25
7. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO	28
7.1. RECONOCIMIENTO DEL DISTRITO DE RIEGO ACTUAL Y NECESIDADES DE COBERTURA.....	31
7.1.1. Municipio De Girón, Santander	31
7.1.2. Vereda Llano Grande, Girón	32
7.1.3. Funcionamiento Del Distrito De Riego Actual	33

7.2.	GEORREFENCIACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y SELECCIÓN DE BENEFICIARIOS	36
7.2.1.	Georreferenciación De La Vereda Llano Grande.....	36
7.2.2.	Caracterización De Cultivos.....	39
7.2.3.	Selección De Beneficiarios	41
7.3.	CÁLCULOS DE CONSUMO DE AGUA POR CULTIVO	42
7.4.	DIMENSIONADO DEL SISTEMA HIDRÁULICO.....	46
7.4.1.	Selección De Bomba En Dc	46
7.4.2.	Ecuación De La Tubería Para Bombeo En Dc	48
7.4.3.	Selección De Bomba En Ac	51
7.4.4.	Ecuación De La Tubería Para Bombeo En Ac	53
7.4.5.	Altura Neta Positiva En La Aspiración	54
7.4.6.	Red De Distribución De Agua	56
7.5.	DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO	61
7.5.1.	Energía Hidráulica Vs Horas De Sol Pico.....	61
7.5.2.	Potencia Pico Del Sistema.....	63
7.5.3.	Conformación Del Campo Solar	64
7.5.4.	Instalación Eléctrica	66
7.5.5.	Ángulo Óptimo Y Separación Entre Paneles	69
7.6.	PRESUPUESTO DEL PROYECTO	70
8.	CONCLUSIONES	74
9.	BIBLIOGRAFÍA	75
10.	ANEXOS	78

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema general de evapotranspiración	15
Ilustración 2. Esquema de bombeo de agua	17
Ilustración 3. Ejemplo de fluido laminar y fluido turbulento	18
Ilustración 4. Rugosidad interna de las tuberías y mangueras	19
Ilustración 5. Esquema de un bombeo solar	23
Ilustración 6. Esquema de distanciamiento entre filas de paneles	24
Ilustración 7. Fases de la metodología implementada para el desarrollo del proyecto	29
Ilustración 8. Actividades para llevar a cabo las fases metodológicas	29
Ilustración 9. Ubicación del municipio de Girón, Santander	31
Ilustración 10. Área de la vereda de Llano Grande.....	32
Ilustración 11. Desarenador de la captación principal del distrito de riego	33
Ilustración 12. Tubería de desagüe del sedimento de la captación principal.....	33
Ilustración 13. Bocatoma principal en el Río de Oro.....	34
Ilustración 14. Reservorio de 1080 m ³ del distrito de riego actual	34
Ilustración 15. Reservorio secundario del distrito de riego actual	35
Ilustración 16. Mapa en Google Earth de la vereda Llano Grande	38
Ilustración 17. Curva de nivel de la vereda Llano Grande.....	38
Ilustración 18. Tipos de cultivos que se manejan en la vereda	39
Ilustración 19. Cantidad de área cultivada por finca.....	40
Ilustración 20. Porcentaje de personas que bombean	40
Ilustración 21. Tipo de sistema de riego que se utiliza para los cultivos	41
Ilustración 22. Mapa de los habitantes seleccionados para el proyecto	42
Ilustración 23. Temperatura máxima y mínima en la vereda Llano Grande.....	43
Ilustración 24. Bomba solar DS3000-60-17 Kesheng	47
Ilustración 25. Gráfica característica de la bomba DS 3000-60-17	47
Ilustración 26. Ecuación de la tubería para bombeo en DC.....	50
Ilustración 27. Ecuación de la tubería y bombas en serie requeridas en DC	50
Ilustración 28. Bomba en AC T1006x4ME30	52
Ilustración 29. Gráfica característica de la bomba T1006x4ME30	52
Ilustración 30. Ecuación de la tubería vs ecuación bomba en AC	54
Ilustración 31. NPSH Disponible vs NPSH Requerido para las dos alternativas	55
Ilustración 32. Esquema del sistema de drenado de agua	56
Ilustración 33. Salto entre el tanque y los beneficiarios del sistema 1	57
Ilustración 34. Salto entre el tanque y los beneficiarios del sistema 2.....	58
Ilustración 35. Arreglo de paneles AS-6P-340W para alternativa en DC.....	65
Ilustración 36. Diagrama unifilar del sistema de bombeo en DC	67
Ilustración 37. Diagrama unifilar del sistema de bombeo en AC	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Antecedentes del proyecto.....	26
Tabla 2. Georreferenciación de los habitantes de la parte alta de la vereda	36
Tabla 3. Georreferenciación de los habitantes de la parte baja de la vereda	37
Tabla 4. Radiación solar por mes en la vereda Llano Grande	42
Tabla 5. Precipitación mensual en la vereda Llano Grande	43
Tabla 6. Cálculos de evapotranspiración y precipitación efectiva.....	45
Tabla 7. Necesidades netas de riego para el limón por mes	46
Tabla 8. Caudal para cada sistema en paralelo en DC para las 5.96 HSP	46
Tabla 9. Variables independientes para el cálculo de la ecuación de la tubería.....	48
Tabla 10. Fricción en los momentos de aspiración e impulsión para bombeo en DC.....	49
Tabla 11. Pérdidas por tubería por bombeo en DC	49
Tabla 12. Caudal para el sistema de bombeo en AC para 5.96 HSP	51
Tabla 13. Fricción para sistema de bombeo en AC	53
Tabla 14. Pérdidas por sistema de tubería para bombeo en AC	53
Tabla 15. Diámetros comerciales para el sistema A en la red de distribución	58
Tabla 16. Diámetros comerciales para el sistema B en la red de distribución	59
Tabla 17. Accesorios en el sistema 1 de la red de distribución de agua.....	59
Tabla 18. Accesorios en el sistema 2 de la red de distribución de agua	60
Tabla 19. Presión para cada punto del sistema 1	60
Tabla 20. Presión para cada punto del sistema 2	61
Tabla 21. Relación entre energía hidráulica y HSP para bombeo en DC.....	62
Tabla 22. Relación entre energía hidráulica y HPS para bombeo en AC.....	62
Tabla 23. Potencia pico que demanda el sistema de bombeo en DC.....	63
Tabla 24. Potencia pico que demanda el sistema de bombeo AC	64
Tabla 25. Especificaciones técnicas del panel AS-6P-340W	65
Tabla 26. Presupuesto para la alternativa de bombeo en DC	71
Tabla 27. Presupuesto para la alternativa de bombeo en AC	72
Tabla 28. Proyección de costos del sistema en DC	73
Tabla 29. Proyección de costos del sistema en AC	73

INTRODUCCIÓN

Los distritos de riego son obras de infraestructura cuya función es suministrar el recurso hídrico necesario para el desarrollo de los cultivos o suelos productivos, dentro de estas infraestructuras se pueden tener plantas de bombeo, tanques de almacenamiento, pozos, entre otros. La vereda Llano Grande ubicada en el municipio de Girón, Santander, Colombia, esta conformada por 39 familias; esta vereda actualmente cuenta con un sistema de distrito de riego que solo le permite abastecer a 24 familias de la zona, es decir, 15 de ellas no tienen acceso al sistema, adicionalmente las fincas que tiene acceso al distrito de riego han incrementado su área de cultivo y esto indica que el sistema actual no puede abastecer toda su demanda de agua.

Para solucionar este problema se plantea un sistema de bombeo solar para cultivos el cual consiste en el dimensionamiento de dos alternativas (una para corriente directa y otra para corriente alterna) de bombeo alimentadas por paneles solares que permitirá distribuir el recurso hídrico a las zonas requeridas, estos sistemas han tomado popularidad en los últimos años por el simple hecho que es un sistema que no utiliza combustibles fósiles y se puede instalar con facilidad en lugares donde no llega la red eléctrica.

En este libro se encontrará la metodología empleada para la realización del proyecto, luego se presentarán dos propuestas, una para un sistema de bombeo con bomba hidráulica en AC y otra con bombas hidráulicas en DC; dentro de estas dos alternativas se realiza el dimensionamiento del sistema hidráulico en donde se selecciona la bomba, se obtiene los parámetros de la tubería que distribuirá el agua, se calculará la altura neta positiva de aspiración y se obtendrá la red de distribución del agua. Luego del dimensionamiento hidráulico se realizará el dimensionamiento fotovoltaico con el cual se alimentan las bombas y en el que permite seleccionar el número de paneles que requerirá el proyecto. Por último, el documento presenta el presupuesto del proyecto para las dos opciones mencionadas anteriormente.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El departamento de Santander aportó durante el año 2019 el 6,91% al PIB (Producto Interno Bruto) Nacional, el cual se encuentra distribuido de la siguiente manera: sector Agropecuario 14,16%; Industria y Comercio 17,3 %; Construcción 10% y Comercio 58,54%. Dentro del sector agropecuario departamental, la vereda Llano Grande ubicada en el municipio de Girón presenta una considerable participación. Sin embargo, el 38% de las familias dedicadas a la agricultura, presentan deficiencia en la cobertura proveniente del actual distrito de riego, el cual es propiedad del municipio. Debido a esto, los agricultores de esta vereda se ven obligados a utilizar motobombas para hacer llevar el agua desde el Río de Oro hasta sus propios domicilios, lo que genera una alta demanda energética la cual se ve reflejada en el aumento del precio de las facturas de energía eléctrica para los habitantes de la zona, aumentando sus costos de producción. Entonces, ¿Cómo se podría ampliar la cobertura del distrito de riego integrando los sistemas de generación fotovoltaica a los actuales requerimientos energéticos de las familias que presentan un déficit en sus sistemas de riegos actuales?

2. RESUMEN

El fin principal de este proyecto es realizar el dimensionamiento de un sistema de bombeo solar para satisfacer la demanda de agua de los cultivos de los propietarios en la vereda Llano Grande, ubicada en el municipio de Girón; para esto se realizaron varias visitas con el objetivo de caracterizar el sistema que actualmente se encuentra y de esta manera seleccionar en primera instancia los posibles beneficiarios del proyecto.

Se inició con el recorrido de todo el sistema de riego desde las tres bocatomas hasta sus dos reservorios. Se realizó una encuesta a 39 finqueros con el objetivo de caracterizar las necesidades de la zona y luego se procedió a realizar la selección de los posibles beneficiarios.

Para dimensionar el sistema de bombeo solar se comenzó con una georreferenciación para obtener información de posición y altura para así mismo ubicar dichos puntos en la herramienta virtual Google Earth. En segundo lugar se calcularon las necesidades netas de riego por mes para un cultivo estandarizado teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas de la zona y el tipo de cultivo que en este caso es el limón, correspondiente para un área total de una hectárea siendo estos dos parámetros anteriores acordados con la entidad promotora del proyecto para favorecer a cada usuario.

Seguidamente, se procedió a realizar el dimensionamiento del sistema hidráulico de las dos alternativas partiendo desde unas necesidades de caudal diario y de transportar el agua a una altura geométrica determinada. Luego se dimensionó el sistema fotovoltaico que alimenta cada una de las alternativas, donde se tuvo en cuenta las 5.96 horas sol pico, la potencia pico del sistema de bombeo y energía hidráulica para cada mes para así poder elegir el arreglo de paneles más adecuado.

Por último, se propuso un presupuesto de todos los implementos e instrumentos que se necesitan para llevar a cabo la implementación total del proyecto. Los resultados indican que la alternativa de bombas en DC a una altura de 92,2 metros y un caudal de 314 m³/día para satisfacer la demanda, se necesita una potencia pico a instalar de 40,26 kW para la alimentación de las 12 bombas de esta alternativa, teniendo en total 120 paneles conectados con un conductor calibre 14AWG y para la implementación de este proyecto se obtuvo un presupuesto de 563 millones COP. Finalmente para el caso del bombeo en AC se necesita una potencia pico a instalar de 34,51 kW para suplir la energía demandada por la bomba en corriente alterna, utilizando un inversor, calibres de conductores de 14 AWG (para las conexiones en serie) y 6 AWG (para las conexiones de los paralelos), con un presupuesto de 526 millones de pesos colombianos, reflejando ser la alternativa que da respuesta a la necesidad a menor costo.

PALABRAS CLAVES: DISTRITO DE RIEGO, BOMBEO SOLAR, INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA, PRESUPUESTO.

3. ABSTRACT

The main purpose of this project is to carry out the dimensioning of a solar pumping system to satisfy the water demand of the crops of the owners in the Llano Grande district, located in the municipality of Girón; for this, several visits were made in order to characterize the system that is currently in place and thus select in the first instance the possible beneficiaries of the project.

It started with the route of the entire irrigation system from the three intakes to its two reservoirs. A survey was conducted of 39 farmers with the objective of characterizing the needs of the area and then proceeded to make the selection of possible beneficiaries.

To dimension the solar pumping system, a georeferencing was started to obtain position and height information to locate these points in the Google Earth virtual tool. Secondly, the net irrigation needs per month for a standardized crop were calculated taking into account the meteorological conditions of the area and the type of crop that in this case is lemon, corresponding to a total area of one hectare, these two parameters being previously agreed with the entity promoting the project to favor each user.

Subsequently, the sizing of the hydraulic system of the two alternatives was carried out, starting from the needs of daily flow and of transporting the water to a determined geometric height. Then the photovoltaic system that feeds each of the alternatives was dimensioned, where the 5.96 hours of peak sun, the peak power of the pumping system and hydraulic energy for each month were taken into account in order to be able to choose the most suitable panel arrangement.

Lastly, a budget was proposed for all the implements and instruments needed to carry out the full implementation of the project. The results indicate that the alternative of pumps in DC at a height of 92.2 meters and a flow of 314 m³ / day to satisfy demand, a peak power to be installed of 40.26 kW is needed to supply the 12 pumps of this alternative, having a total of 120 panels connected with a 14AWG conductor and for the implementation of this project a budget of COP 563 million was obtained. Finally, in the case of AC pumping, a peak power to be installed of 34.51 kW is needed to supply the energy demanded by the pump in alternating current, using an inverter, 14 AWG conductor gauges (for series connections) and 6 AWG (for parallel connections), with a budget of 526 million Colombian pesos, reflecting that it is the alternative that meets the need at the lowest cost.

KEYWORDS: IRRIGATION DISTRICT, SOLAR PUMPING, PHOTOVOLTAIC INSTALLATION, BUDGET.

4. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proponer un diseño de sistema hidráulico y fotovoltaico, con el fin de suplir las necesidades energéticas del distrito de riego ubicado en la vereda Llano grande, del municipio de Girón.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el estado y cobertura del distrito de riego de la vereda Llano Grande ya existente.
- Dimensionar el sistema hidráulico y sistema fotovoltaico para la implementación de un nuevo sistema de riego.
- Elaborar el presupuesto para la inversión inicial del proyecto propuesto.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. NECESIDADES DE RIEGO

La cantidad de agua que se necesita para compensar la pérdida por evapotranspiración (evaporación y transpiración de la planta), indica el requerimiento del recurso hídrico para un determinado tipo de cultivo. Mientras que las necesidades de agua de un cultivo, hacen referencia a la cantidad que se necesita aplicar, y que se puede obtener de la lluvia o suplir por riego artificial.

En consecuencia, las necesidades netas de riego para un cultivo representa la diferencia entre las necesidades de agua del cultivo y la precipitación efectiva; por tal motivo, para llegar a lo mencionado se abarcan una serie de variables previas para calcular esta demanda total de agua del cultivo.

5.1.1. Radiación Solar Incidente

La radiación solar incidente es el conjunto de radiaciones electromagnéticas del sol en un área específica. Dicha radiación solar incidente se evalúa a partir de la radiación solar extraterrestre (la que llega a la parte exterior de la atmosfera, que sería la que llegaría al suelo si no existiera atmosfera). [1]

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

Donde:

R_s = Radiación solar incidente [mm/día]

R_0 = Radiación solar extraterrestre [mm/día]

K_T = Coeficiente [Adimensional]

T_{max} = Temperatura máxima diaria [°C]

T_{min} = Temperatura mínima diaria [°C]

Los valores de R_0 se encuentran tabulados en el anexo 1, y las temperaturas máximas y mínimas son datos relativamente fáciles de obtener de cualquier base de datos de una estación meteorológica, la dificultad para aplicar la anterior expresión recae en encontrar el coeficiente K_T , por lo tanto, según Hargreaves K_T es un coeficiente empírico y recomienda usar $K_T = 0,162$ para regiones en el interior y $K_T = 0,19$ para regiones en la costa.

5.1.2. Evapotranspiración Potencial

Se denomina evapotranspiración potencial a la cantidad máxima teórica de vapor de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación y constantemente abastecido de agua. Se expresa en mm por unidad de tiempo. Depende de factores tales como orden climático, relativos a tipo de planta y tipo de suelo.

La fórmula de Hargreaves para evaluar la evapotranspiración potencial necesita solamente datos de temperatura y radiación solar. [2]

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

Donde:

ET_0 = Evapotranspiración potencial diaria [mm/día]

T_{med} = Temperatura media [°C]

R_s = Radiación solar incidente, convertida en [mm/día]

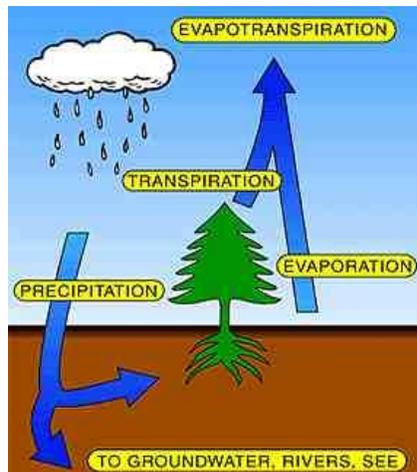


Ilustración 1. Esquema general de evapotranspiración

Tomado de www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/evapotranspiration-and-water-cycle

5.1.3. Precipitación Efectiva

La precipitación efectiva o útil, se define como el agua proveniente de lluvia que se infiltra en el suelo, sin llegarse a perder por escorrentía o por filtración profunda, y permanece a disposición de las raíces de las plantas sin ahogarlas. Siendo así no toda la precipitación que

cae al suelo penetra de manera efectiva en este y es aprovechado en los cultivos. En una lluvia determinada, sólo un porcentaje de esta misma cumple con esta función.

Para el cálculo de la precipitación efectiva (P_e), la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), propone las ecuaciones utilizadas el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USSCS). [3]

- Para una precipitación mensual (P_m) menor de 250mm:

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

- Para una precipitación mensual (P_m) mayor de 250mm:

$$P_e = 0,1P_m + 125 \quad (4)$$

5.1.4. Evapotranspiración Del Cultivo

Se denomina evapotranspiración máxima del cultivo (ET_c) a la evapotranspiración que tiene lugar cuando no existe ninguna restricción de agua en el suelo. Para su determinación se usa el método desarrollado por Doorenbos y Pruitt (1977), en el que la ET_c se calcula mediante [3]:

$$ET_c = ET_o * K_c \quad (5)$$

Donde:

ET_o = Evapotranspiración de referencia [mm/día]

K_c = Coeficiente del cultivo (Anexo 2)

5.1.5. Precipitación Confiable O Necesidades Netas De Riego

Las plantas tienen unas necesidades variables de agua a lo largo de su ciclo de cultivo que en principio deben ser cubiertas con la precipitación. Cuando la precipitación no es suficiente debemos recurrir al riego, y habrá que aportar aquella cantidad de agua que necesita la planta y que no cubre la precipitación del sitio [4]. Conceptualmente se expresa de la siguiente manera:

$$NR = ET_c - P_e \quad (6)$$

Donde:

ET_c = Evapotranspiración del cultivo [mm/mes]

P_e = Precipitación efectiva del sitio [mm/mes]

NR = Necesidades netas de riego [mm/mes]

5.2. DIMENSIONADO DE SISTEMA HIDRÁULICO

A continuación se procede a definir las variables que corresponden al dimensionado del sistema hidráulico del proyecto, siendo así se hace referencia a pérdidas de carga en tuberías, pérdidas por accesorios, número de Reynolds, ecuación de Darcy-Weisbah, y finalmente factores para el buen funcionamiento de la bomba, todo esto con el objetivo general de transportar el agua desde un punto de menor altura a un sitio de mayor altura.

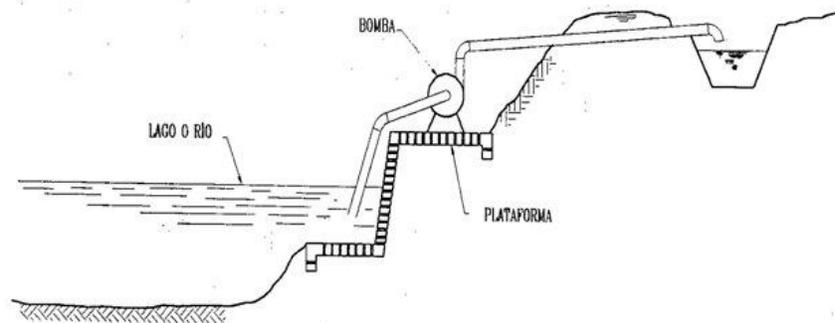


Ilustración 2. Esquema de bombeo de agua

Tomado de <https://civilgeeks.com/2010/10/08/obras-de-captacion-sistema-de-agua-potable/>

5.2.1. Estimaciones De Pérdida De Carga

Existen dos tipos de pérdidas de carga:

Las pérdidas de carga continua (h_f): hacen referencia a la consecuencia de la fricción con tuberías y mangueras.

Las pérdidas de carga accidentales, singulares o localizadas (h_s): son las pérdidas provocadas por el paso del agua a través de puntos singulares; cuantitativamente suelen ser muy inferiores a las primeras.

Las pérdidas de carga totales (h_t) serán iguales a la suma de las continuas más las singulares, y dado lo mencionado de estas últimas en las condiciones más habituales, prácticamente iguales a las continuas [4]:

$$h_t[m] = h_f[m] + h_s[m] = h_f \quad (7)$$

5.2.2. Número De Reynolds

El número de Reynolds (Re) es un parámetro adimensional relacionado con las características del flujo. En concreto, representa la relación entre las fuerzas de inercia del fluido (derivado a su movimiento) y las fuerzas de fricción (consecuencia del rozamiento del fluido con las paredes de la tubería). [5]

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho * v * D}{\mu} \quad (8)$$

Donde:

ρ = Densidad del fluido [kg/m³]

v = Velocidad del fluido [m/s]

D = Diámetro interno de la tubería [m]

μ = Viscosidad dinámica del fluido [kg·m⁻¹·s⁻¹]

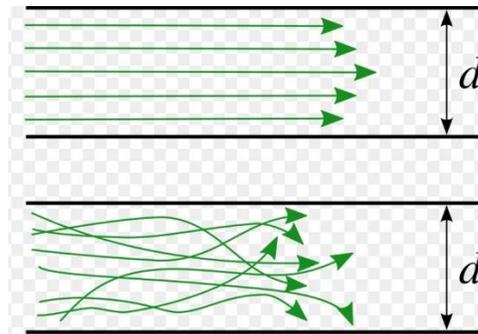


Ilustración 3. Ejemplo de fluido laminar y fluido turbulento

Tomado de https://favpng.com/png_view/laminar-flow-turbulence-fluid-dynamics-reynolds-number-png/30YkV8tz

5.2.3. Ecuación De Darcy-Weisbach

En dinámica de fluidos, la ecuación de Darcy-Weisbach es una ecuación empírica que relaciona la pérdida de carga hidráulica (o pérdida de presión) debido a la fricción a lo largo de una tubería dada con la velocidad media del flujo del fluido. [5]

$$hf = \frac{f * L * V^2}{2 * g * D} \quad (9)$$

Donde:

f = Factor de fricción de Darcy [adimensional]

h_f = Pérdida de carga debida a fricción [metros de columna del fluido]

L = Longitud de tubería [m]

D = Diámetro de la tubería [m]

V = Velocidad media del fluido [m/s]

g = Aceleración de la gravedad [m/s^2]

Para el cálculo del factor de fricción de Darcy, se rigen los dos siguientes parámetros:

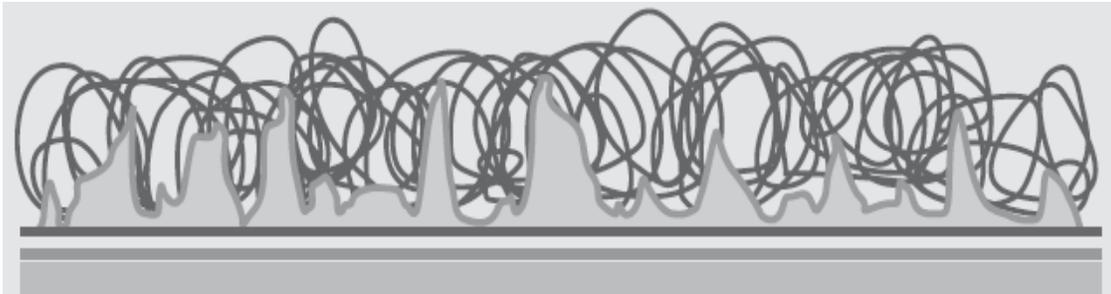


Ilustración 4. Rugosidad interna de las tuberías y mangueras

Tomado de Manual Práctico para el diseño de sistemas de minirriego FAO

- Para $Re < 2000$ se dice que existe un régimen laminar en el flujo de agua, y la ecuación para su cálculo es:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (10)$$

- Para $Re > 2000$, el flujo de agua se dice que está en los regímenes crítico o turbulento, por lo tanto se usa la ecuación de Swamee-Jain con el objetivo de encontrar el factor de fricción de Darcy directamente sin interacciones [6]

$$f = 0.25 \left[\log \left(\frac{k/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.25}} \right) \right]^{-2} \quad (11)$$

Donde:

f = Factor de fricción de Darcy [Adimensional]

Re = Número de Reynolds [Adimensional]

k = Rugosidad del material de la tubería [m]

D = Diámetro interno de la tubería [m]

5.2.4. Npsh Disponible Y Requerido

NPSH (Net Positive Suction Head) o en español ANPA (Altura Neta Positiva de Aspiración) es el parámetro que permite determinar si una bomba puede funcionar correctamente sin entrar en cavitación, dicho fenómeno se da cuando la presión del fluido desciende por debajo de la presión de vapor, las moléculas del líquido pasan a estado gaseoso formando burbujas, estas burbujas se desplazan dentro del flujo del líquido a zonas donde la presión es más elevada, donde vuelven a condensarse de manera súbita. [7]

- La NPSH requerida es la altura mínima de aspiración que se necesita para evitar la cavitación. Este valor depende de las características de la bomba, por lo que el fabricante lo suele facilitar en su documentación técnica. Sin embargo, en algunos casos el fabricante no proporciona la información del NPSH, en ese caso, se procede a utilizar la siguiente expresión:

$$NPSH_{req} = \frac{8 * Q^2}{\pi^2 * D^2 * g} + Z_{asp} \quad (12)$$

$NPSH_{req}$ = Altura mínima de aspiración requerida [m]

Q = Caudal de aspiración [m^3/s]

D = Diámetro interno de la tubería [m]

g = Aceleración de la gravedad [m/s^2]

Z_{asp} = Altrura geométrica de aspiración

- La NPSH disponible depende de las características del circuito y proporciona una indicación del riesgo de cavitación. Depende de la altura de aspiración y de la presión de vapor del líquido.

$$NPSH_{disp} = \frac{P_{atm} - P_{sat@25C}}{\rho * g} - \frac{f * L * Q^2}{2 * D * g * A^2} - Z_{asp} \quad (13)$$

Donde:

P_{atm} = Presión atmosférica del lugar [kPa]

$P_{sat@25C}$ = Presión de saturación del fluido a 25 Celsius [kPa]

f = Factor de fricción de Darcy [Adimensional]

L = Longitud de la tubería de aspiración [m]

D = Diámetro interno de la tubería [m]

g = Aceleración de la gravedad [m/s^2]

A = Área de la tubería [m^2]

Q = Caudal de aspiración [m^3/s]

Z_{asp} = Altrua geométrica de aspiración [m]

ρ = Densidad del fluido [kg/m^3]

5.2.5. Pérdidas Por Fricción En Accesorios

A medida que un fluido fluye por un conducto, tubo o algún otro dispositivo, ocurren pérdidas de energía expresados como pérdidas de altura debido a la fricción o accesorios; dichas energías traen como resultado una disminución de la presión entre dos puntos del sistema de flujo o caída de altura por contracción o ganancia de altura por expansión. [8]

$$i = \left(\frac{f * \frac{L}{D} + \sum K}{2 * g * D} \right) Q + H_{geo} \quad (14)$$

Donde:

i = Pérdidas totales del sistema [m]

L = Longitud del sistema [m]

D = Diámetro interno de la tubería [m]

K = Factor de pérdida por tipo de accesorios (anexo 3)

g = Aceleración de la gravedad [m/s^2]

Q = Caudal bombeado [m^3/s]

H_{geo} = Altura geométrica a bombear el fluido [m]

Este valor de pérdidas totales del sistema i , vienen incluidas las perdidas por todo el tramo de tubería, por lo tanto, se hacen los respectivos cálculos para el tramo de impulsión y el tramo de aspiración.

5.2.6. Presión Hidrostática

El concepto de presión hidrostática se denomina como la presión que ejerce un fluido sobre el recipiente que lo contiene y sobre la superficie de cualquier objeto que se encuentre sumergido en él, provocando una fuerza perpendicular en las paredes del recipiente sin importar la orientación que adopte dicho objeto que lo contenga [9] . Dicha presión se calcula de la siguiente manera:

$$P = \rho * g * h + P_{atm} \quad (15)$$

Donde:

P = Presión hidroestática [Pa]

ρ = Densidad del líquido [kg/m^3]

g = Aceleración de la gravedad [m/s^2]

h = Altura del fluido [m]

P_{atm} = Presión atmosférica del lugar [Pa]

5.3. DIMENSIONADO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA BOMBEO SOLAR

Los sistemas de bombeo fotovoltaico son implementados generalmente donde no es posible acceder a la red eléctrica. Adicionalmente, sus costos de puesta en situ pueden variar notoriamente con respecto a las necesidades de recurso hídrico que el usuario demande, pero se encuentra beneficios tales como menor impacto ambiental y bajo costo de mantenimiento que los sistemas de bombeo alimentados mediante motores de combustión interna.

Las bombas utilizadas pueden ser tanto en corriente alterna o en corriente continua. En la mayoría de los casos se usan las bombas de corriente continua para pequeñas aplicaciones, por lo tanto, para aplicaciones medianas y grandes se usan bombas de corriente alterna acoplados a un inversor que convierte la corriente DC generada por los paneles fotovoltaicos en corriente AC.

Los sistemas de bombeo son dimensionados teniendo en cuenta las condiciones de irradiación del lugar, la necesidad de agua por día y la altura dinámica a bombear. Por lo general, no se

acostumbra la implementación de baterías, por lo que para dar solución a este problema es recomendable instalar un reservorio de agua para los días donde la irradiación solar es baja.

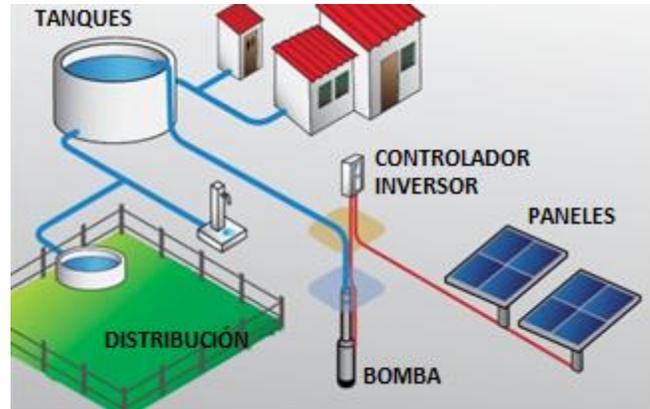


Ilustración 5. Esquema de un bombeo solar

Tomado de <https://www.cambioenergetico.com/blog/ventajas-bombeo-solar/>

5.3.1. Potencia Pico En Paneles

Es necesario calcular la potencia eléctrica pico para satisfacer la demanda, por lo tanto, se define la potencia pico en paneles como la máxima potencia eléctrica que se necesita generar bajo las condiciones del sitio en el cual se va a realizar la instalación [10]:

$$Pp = \frac{Eh * 1000}{n_{mb} * n_c * F_m [(1 - Y)(Tc - 25)] * Gdm} \quad (16)$$

Donde:

Pp = Potencia pico a generar en paneles [W]

n_c = Eficiencia del controlador o inversor para la bomba [%]

F_m = Factor de acople medio [Adimensional]

Y = Factor de pérdidas por temperatura [%/°C]

T_c = Temperatura media del panel [°C]

n_{mb} = Eficiencia de la motobomba [%]

G_{dm} = Radiación solar media mensual [HSP]

5.3.2. Separación Entre Paneles

La distancia medida sobre la horizontal que hay que dejar viene marcada por la latitud del lugar de instalación, ya que en función de este parámetro varía el ángulo de incidencia solar. Para ello, hay que dejar una distancia mínima al elemento que pueda producir un sombreado en los paneles solares. La posibilidad de sombra en verano es mucho menor, ya que el recorrido del sol es mucho más alto, y, por lo tanto, la sombra arrojada del obstáculo que haya delante es más pequeña [11].

$$D = (Lm * \cos\beta) + \left(\frac{Lm * \operatorname{Sen}\beta}{\operatorname{Tan}(90^\circ - \beta)} \right) \quad (17)$$

Donde:

D = Distancia mínima entre dos filas consecutivas [m]

Lm = Longitud del módulo fotovoltaico [m]

β = Inclinación del módulo fotovoltaico con respecto al plano horizontal del montaje. [Grados]

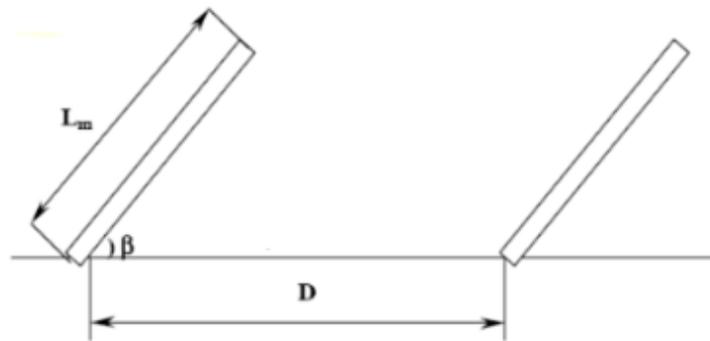


Ilustración 6. Esquema de distanciamiento entre filas de paneles

Tomado de Radiación solar y dispositivos fotovoltaicos, Eduardo Lorenzo

5.3.3. Ángulo Óptimo

Para determinar la inclinación de los paneles fotovoltaicos es necesario conocer la época en la cual se va a dimensionar el sistema de generación (invierno, verano, primavera, otoño). Dicha inclinación se tiene en cuenta para sacar el máximo rendimiento de los paneles solares, con el fin de lograr una incidencia de radiación solar perpendicular al panel. La siguiente expresión es para los lugares que son considerados la mayor parte del año en verano (para este caso, Llano Grande, Girón) [10]:

$$\beta_{opt} = 20^\circ - Lat \quad (18)$$

Donde:

Lat = Latitud del sitio a realizar la implementación. [Grados]

β_{opt} = Ángulo óptimo con respecto a la horizontal para los paneles fotovoltaicos [Grados]

5.3.4. Temperatura Media Del Módulo Fotovoltaico

Para un sistema fotovoltaico, desde el punto de vista del acoplamiento correspondiente al generador y motor-bomba, las mayorías de temperaturas del panel afectan negativamente al rendimiento que se alcanza en los momentos de mayor irradiancia. Por lo tanto es habitual utilizar la siguiente ecuación para determinar la temperatura media de las células fotovoltaicas mediante la siguiente expresión [10]:

$$T_c = T_a + 0.03G \quad (19)$$

Donde:

T_c = Temperatura media del módulo fotovoltaico [°C]

T_a = Temperatura máxima ambiente del sitio [°C]

G = Irradiación promedio del día [W/m²]

6. ESTADO DEL ARTE

Se realizó una compilación de trabajos previamente desarrollados a este con el fin de afianzar la formulación del problema o tema investigativo y adicionalmente compartir información y establecer comparaciones con otros conocimientos paralelos, ofreciendo diferentes posibilidades de comprensión del problema a tratar debido a múltiples alternativas con respecto al tema de estudio.

Tabla 1. Antecedentes del proyecto

Nombre	Publicación y autor	Resumen	Aporte al proyecto.
Diseño de la red de distribución de un minidistrito de riego para los corregimientos la palma y tres puertas, municipio de restrepo (valle del cauca)	Leidy Jhoana Agudelo Moreno Y Viviana Pino, 2012 [12]	Ante la necesidad de agua para riego, los habitantes de los corregimientos LA PALMA Y TRES PUERTAS, en el valle de Cauca, estos estaban utilizando el agua del acueducto rural de la zona, provocando un posible colapso. Por lo que se vio la necesidad de diseñar un distrito de riego para estos habitantes puesto que la agricultura es su único ingreso económico.	A partir de este proyecto se basarán los cálculos de la demanda de agua y dimensionamiento de tuberías.
Hargreaves suspenmanmonteith under humid conditions	Slavisa Trajkovic. 2007	Debido a que las formulas usadas para calcular la evapotranspiración potencial de una zona, eran complicadas porque los datos necesarios no son fáciles de obtener. Hargreaves desarrollo una ecuación empírica muy usada actualmente, que solo usa la temperatura máxima, mínima y la radiación solar y se puede usar en distintos lugares. Pero esta tiene cierto error para zonas con alta humedad. Por lo que este articulo pretende realizar una ecuación de Hargreaves corregida para los lugares con alta humedad.	Especifica las fórmulas necesarias para calcular la evapotranspiración potencial de zonas con alta humedad que posiblemente sirva en la zona a estudiar.
Defining and using reference evapotranspiration	George H. Hargreaves. 1994 [13]	En este artículo realizan un estudio para evaluar si la ecuación para el cálculo de la evapotranspiración potencial de Hargreaves, se puede utilizar de manera confiable y estandarizar de manera	Se utiliza en primer lugar para corroborar los cálculos de de evapotranspiración y en segundo lugar se puede tomar como otra fuente

		<p>mundial. Concluyendo que los datos obtenidos a partir de esta ecuación, pueden ser usados con confianza, debido a que se parecen a los de la ecuación de Penman combinada (una ecuación que tiene en cuenta muchas más variables).</p>	<p>alterna a la principal para tomar datos de la tabla de radiación solar incidente.</p>
<p>Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data</p>	<p>Zohrab Samani, 2000 [14]</p>	<p>Se introduce un procedimiento para estimar la radiación solar. El documento describe una modificación a una ecuación original que utiliza la temperatura máxima y mínima para estimar la radiación solar. La modificación propuesta permite la corrección de errores asociados con parámetros climatológicos indirectos que afectan el rango de temperatura local. solar a partir de la temperatura.</p>	<p>Se obtienen las formulas que permiten calcular la radiación solar, usada en la fórmula de la evapotranspiración con menos porcentaje de error.</p>
<p>Diseño de un sistema de generación para el distrito de riego en Anta Lucia, Atlantico</p>	<p>Mayling Perez y Israel Torres, 2019 [15]</p>	<p>Se realizó un diseño de generación de energía fotovoltaica para un distrito de riego en Santa Lucía, Atlántico, donde se tuvieron en cuenta las diferentes estaciones del distrito para diseñar paneles para cada una de estas. En el cual la estación principal de este distrito llego a tener 2386 KWh de consumo diario en invierno y esta demanda se suplió con 1582 paneles de 335 W cada uno.</p>	<p>Se mencionan los requerimientos y consideraciones a seguir para dimensionar un sistema fotovoltaico para diferentes sistemas de bombeo.</p>
		<p>Este documento explica que es un sistema de mini-riego y da todas las consideración de clima, calidad del agua, geología</p>	<p>Brinda los pasos y consideraciones necesarias para el dimensionamiento de sistemas de</p>

Manual práctico para el diseño de sistemas de mini-riego	Julián Carrazón Alocén, 2007 [16]	e hidráulica para el diseño de un sistema de mini-riego	mini riego y ofrece ecuaciones potencialmente utilizables para el diseño. Además, proporciona tablas con valores de Kc y fórmulas para calcular la precipitación efectiva.
--	--	---	--

A partir de las tesis y artículos mencionados en la tabla 1, se captaron datos, consideraciones y fórmulas que ayudaron al desarrollo del trabajo. Además, estos documentos brindaron un panorama de cómo trabajar y dimensionar los proyectos de bombeo solar y distritos de riego.

Siendo así, el manual práctico para el diseño de sistemas de riego ha tomado popularidad en los últimos años en su país de redacción, dado que se basan de su contenido e información para desarrollar proyectos de esta índole, tales como el distrito de riego San Juan de Flores y Selguapa.

De igual manera, para el desarrollo del proyecto, se utiliza la ecuación general presentada por Zohrab Samani ya que se hace necesario obtener los datos de las necesidades hídricas para riego de cada tipo de cultivo dependiendo de las condiciones meteorológicas de la zona. Consecutivamente, ya obteniendo los datos obtenidos de las necesidades de riego, se precisa diseñar el método del transporte del fluido desde su captación hasta su descargue a los puntos destinados, por lo tanto, se utiliza la información suministrada por Leidy Jhoana Agudelo en su documento “Diseño de la red de distribución de un minidistrito de riego para los corregimientos la palma y tres puertas”. Se concluye con la metodología proporcionada por Maylin Pérez en su documento “Diseño de un sistema de generación para distrito de riego en Anta Lucía, Atlántico” con el objetivo de suplir la demanda energética que presentan los equipos e implementos necesitados en el transporte del agua.

7. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO

La metodología que se desarrolló para llevar a cabo el proyecto consiste en tres fases, tales como levantamiento de datos, análisis de datos y diseño. Tal como son presentadas en la ilustración 7.

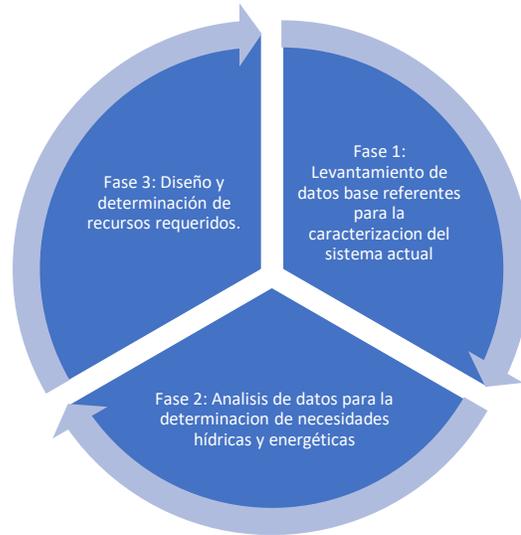


Ilustración 7. Fases de la metodología implementada para el desarrollo del proyecto

Las principales actividades para dar respuesta a las fases metodológicas expuestas se presentan en la ilustración 8 y se detallan a continuación:

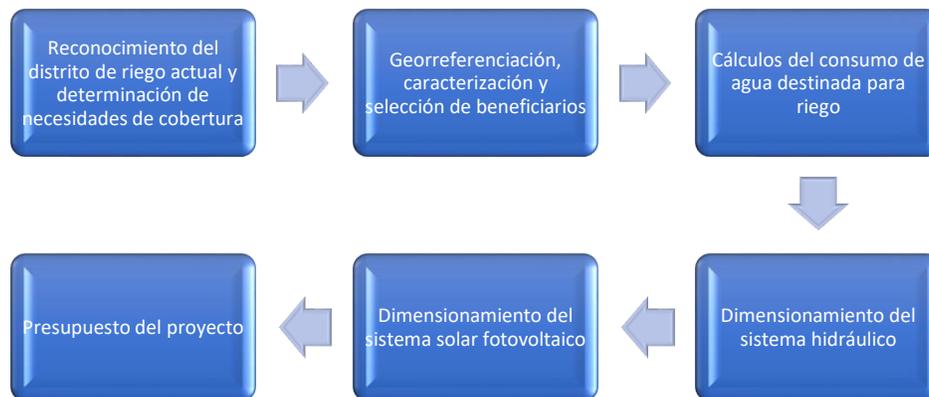


Ilustración 8. Actividades para llevar a cabo las fases metodológicas

- **Reconocimiento Del Distrito De Riego Actual:**

En esta etapa se realizan visitas técnicas con el objetivo de realizar una inspección a la cobertura y funcionamiento del actual distrito de riego. Adicionalmente se visitaron las etapas de toma y descargue de agua para riego y sus respectivos tanques.

- **Georreferenciación Y Caracterización:**

Se realiza la toma de datos correspondientes a posicionamiento y altura de cada uno de los predios de las familias de la vereda Llano Grande. Seguidamente se procede a estandarizar el tipo de cultivo y el área cultivada para su posterior cálculo de necesidades de caudal para riego. Finalmente ubicados los puntos en una herramienta virtual, se procede a seleccionar los beneficiarios para el proyecto en cuestión.

- **Necesidades Netas De Riego:**

Para la estimación del caudal necesitado para el tipo de cultivo y área cultivada previamente estandarizado, se realizan los cálculos pertinentes a las necesidades netas de riego donde se tienen en cuenta variables como radiación solar, temperatura máxima mensual, temperatura mínima mensual y precipitación, extraídos de la base de datos meteorológicos de la NASA.

- **Sistema Hidráulico:**

Para esta etapa del proyecto, se realizó el dimensionamiento para dos escenarios totalmente diferentes de bombeo. El primer escenario hace referencia para un sistema de bombeo en corriente directa y el segundo escenario corresponde a un sistema de bombeo en corriente alterna.

Para las dos alternativas se hace la respectiva selección de bomba teniendo en cuenta los valores de caudal y altura. Seguidamente se cuantifican las pérdidas con el fin de corroborar la correcta selección y funcionamiento de equipo de bombeo. Adicionalmente se obtiene el valor de la altura mínima de aspiración.

Finalmente se dimensiona el sistema de descargue de agua desde el tanque a cada uno de los puntos de las familias seleccionadas, garantizando los mismos valores de caudal y presión a la salida de cada punto.

- **Sistema Solar Fotovoltaico:**

Para realizar el dimensionamiento del campo solar, se parte de obtener el valor de energía hidráulica que el sistema de bombeo le debe entregar al fluido. Seguidamente con valores de eficiencia de la bomba, eficiencia del controlador (para el caso en DC), eficiencia del inversor (para el caso en AC), temperatura media del módulo, factor de pérdidas por temperatura, factor de acople y las horas de sol pico se calcula la potencia pico a instalar. Posteriormente a partir del valor de potencia pico para ambos escenarios, se realiza el arreglo fotovoltaico. Finalmente se calcula el cableado y protecciones para llevar a cabo la instalación eléctrica.

- **Presupuesto Del Proyecto:**

Para la etapa final del proyecto, se presenta el presupuestos para cada una de las dos alternativas con el objetivo de escoger el escenario con menor costo, teniendo en cuenta los costos de instalación y puesta en marcha, costos del sistema fotovoltaico y costos del sistema hidráulico.

7.1. RECONOCIMIENTO DEL DISTRITO DE RIEGO ACTUAL Y NECESIDADES DE COBERTURA

Siguiendo con la metodología planteada, se procedió a realizar una descripción del sitio al cual se le va a dimensionar el sistema de generación fotovoltaica y una explicación correspondiente al reconocimiento del distrito de riego actual.

7.1.1. Municipio De Girón, Santander

San Juan de Girón, antes conocido como Villa de Caballeros de Girón, es un municipio del departamento de Santander, que forma parte del área metropolitana de Bucaramanga al noreste de Colombia. El municipio es conocido a nivel nacional debido a arquitectura de nivel española (calles empedradas, casas con paredes blancas, techos hechos de arcilla). El municipio de Girón fue fundado en 1631, por su arquitectura de la época colonial fue reconocido como Monumento Nacional de Colombia en 1959.



Ilustración 9. Ubicación del municipio de Girón, Santander

Tomado de Google Earth Girón, Santander

El municipio de San Juan de Girón limita al oriente con los municipios de Floridablanca, Piedecuesta y Bucaramanga al occidente con el municipio de Betulia; con los municipios de Sabanas de Torres, Lebrija y Rio Negro por el norte; y al sur con los municipios Zapatoca y Los Santos.

Girón se encuentra a 9 km de la ciudad de Bucaramanga, Cúcuta 195 km y Bogotá 373 km. Adicionalmente posee cuatro corregimientos: Acapulco, Bocas, Chocoita y Marta. Los cuales están divididos en 21 veredas: Carrizal, Riofrío, Llanada, Barbosa, Acapulco, Ruitoque, Palogordo, Chocóa, Cantalta, Chocoita, Motoso, La Parroquia, Llano grande, Sogamoso, Marta, Bocas, Lagunetas, El cedro, Peñas, Pantano y Riosucio.

Dicho municipio, cuenta con una superficie de 475,14 km²; se tiene estimado un total de 135791 habitantes, de los cuales, corresponde a densidad demográfica de 285,79 habitantes por km². [17]

7.1.2. Vereda Llano Grande, Girón

La vereda de Llano Grande, ubicada al sur del municipio de Girón, cuenta con una superficie aproximada de 4,06 km², estos datos fueron obtenidos por medio del software Google Maps. Adicionalmente tienen un valor aproximado de 110 habitantes; tiene una temperatura promedio que oscila entre los 24 y 27 Celsius a una altitud de 790 metros sobre el nivel del mar.

Esta vereda es reconocida por su famosa alta producción de cítricos, en especial el limón tahití, pero también poseen grandes cultivos de naranjas y aguacates.

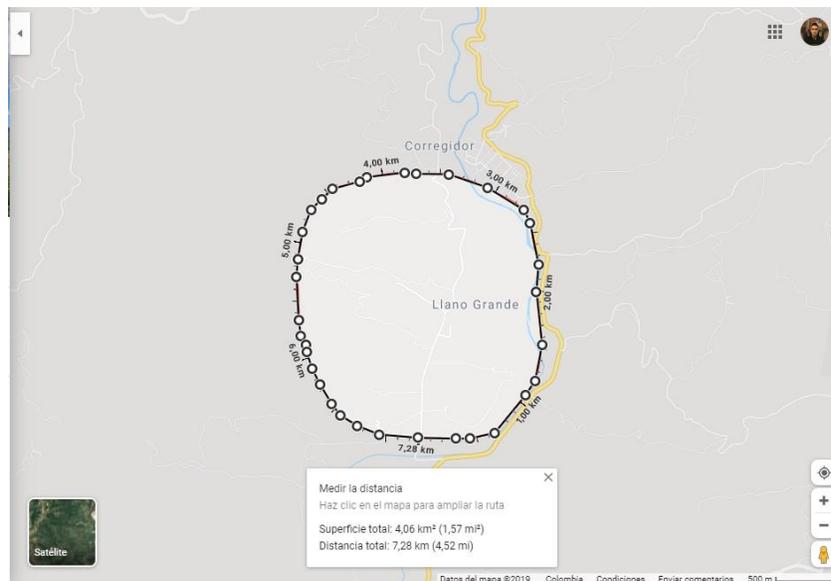


Ilustración 10. Área de la vereda de Llano Grande

Tomado de Google Earth Llano Grande, Girón

7.1.3. Funcionamiento Del Distrito De Riego Actual

De acuerdo con la metodología planteada, este fue el inicio de la elaboración de este proyecto, en donde se realizaron varias visitas técnicas para hacer el completo recorrido de todo el distrito de riego que actualmente está funcionando.

En primera instancia, en compañía de la persona encargada del distrito, se visitaron las tres bocatomas del sistema, las cuales son para la misma finalidad de riego pero con diferentes puntos de toma y puntos de descargue de agua. La primera bocatoma, la que fue considerada como principal, se utiliza para llevar el agua por diferencia de altura desde el Río de Oro hasta el tanque principal y el tanque secundario del distrito, donde posteriormente son también evacuados por diferencial de altura a los puntos de riego. Las dos bocatomas restantes son utilizadas para completar el llenado de los jagüeyes donde llega el agua que no se utilizó de los dos tanques. En estos jagüeyes los habitantes tienen ubicadas bombas centrífugas modificadas y muy antiguas conectadas a red para llevar el agua a puntos donde la tubería del distrito de riego actual no tiene cobertura.



Ilustración 11. Desarenador de la captación principal del distrito de riego



Ilustración 12. Tubería de desagüe del sedimento de la captación principal

Las bocatomas tanto para los jagüeyes como para los reservorios, cuentan con una tubería independiente de 8 pulgadas al inicio y posteriormente a pocos metros de la captación el agua es vaciada en tanques de 4 m³ que actúa como desarenador, el cual hace que se estanque el agua y se sedimente la arena, tierra o partículas no deseadas.



Ilustración 13. Bocatoma principal en el Río de Oro

Para el caso de los sistemas para el llenado de jagüeyes, en la parte superior de estos tanques pequeños, se ubica una tubería de 4 pulgadas, que de la misma manera, por diferencia de altura, el agua es transportada hasta estos puntos. Igualmente, el sistema principal usado para el llenado de reservorios, tiene incorporado una tubería de 8 pulgadas a diferencia de los anteriores mencionados, por la cual es transportado el recurso hídrico aproximadamente 3 kilómetros hasta llegar a un punto donde se divide en dos dicha tubería, gracias a un accesorio de T cerca de las viviendas donde se encuentran los tanques. Finalmente el agua es depositada en estos dos reservorios, el principal de ellos tiene una capacidad para 1080 m³ pero nunca es llenado hasta su totalidad y por último, el segundo depósito posee la mitad del volumen que el primero, es decir, aproximadamente 540 m³.



Ilustración 14. Reservorio de 1080 m³ del distrito de riego actual



Ilustración 15. Reservorio secundario del distrito de riego actual

Este distrito de riego, le proporciona el recurso hídrico suficiente a 24 fincas que se encuentran a una altura menor que la que se encuentran ambos tanques, estas fincas son las más antiguas y por lo tanto fueron las que en un principio se tuvieron en cuenta para el dimensionamiento del sistema que se encuentra funcionando. Por otra parte, a medida que han pasado los años, nuevas fincas se han construido y por lo tanto no tienen cobertura del distrito de riego porque es imposible instalar alguna extensión o ramificación debido a su posición lejana o simplemente se encuentran a una mayor altura que la cota de la tubería. Siendo así, cada uno de estos nuevos finqueros que en totalidad son 15, tienen que realizar bombeos desde los jagüeyes anteriormente mencionados hasta donde ellos requieran transportar el agua.

No obstante, las fincas antiguas han incrementado su área cultivada y por lo tanto demandan una cantidad mayor de agua a lo que se tenía planteado en el momento de dimensionar el distrito, entonces aproximadamente diez años, se crearon turnos para el abastecimiento de agua proveniente desde los reservorios, dichos turnos hace referencia a que 12 de los finqueros antiguos pueden usar el agua de los tanques mientras que al siguiente día, la otra mitad de los finqueros pueden usar el agua con el objetivo de no tener debastecimiento para algún integrante.

Finalmente, se tiene que este distrito de riego se encuentra funcionando hace más de 40 años y son muy contadas las veces que se le ha realizado algún tipo de mantenimiento; sin embargo, los principales problemas surgen en la etapa de descarga de los tanques, ya que muchas veces las tuberías están expuestas a rompimientos o fisuras debido al desgaste temporal de estos ductos siendo así, una única persona encargada de la totalidad del sistema, desde la captación del agua hasta la distribución en las 24 fincas.

7.2. GEORREFENCIACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y SELECCIÓN DE BENEFICIARIOS

En esta sección se presentan los datos obtenidos a partir del proceso de georreferenciación, criterios de selección de beneficiarios y la respectiva caracterización del cultivo.

7.2.1. Georreferenciación De La Vereda Llano Grande

Con el fin conocer la cobertura del actual distrito de riego y ubicación de cada una de las familias, fue necesario realizar un recorrido completo de todas las fincas, en el cual, con ayuda de un GPS que proporcionaba coordenadas en sistema UTM y la elevación sobre el nivel del mar. Se visitaron las 39 propiedades y se tomaron en cada una de estos dos datos para estimar los posteriores cálculos de dimensionamiento que se mencionarán detalladamente más adelante. Además, se realizó el mismo proceso de georreferenciación de la bocatoma principal y de los dos reservorios mencionados en el capítulo anterior, al igual que las dos bocatomas correspondientes para el llenado de los jagüeyes. Cabe resaltar, que se decidió dividir en dos grupos los datos, pues como ya se sabe, hay cierta cantidad de personas que no se encuentran asociados al sistema actual (parte alta) y hay otros que si (parte baja).

Tabla 2. Georreferenciación de los habitantes de la parte alta de la vereda

Propietario	North			West			Altura (m)	Latitud	Longitud
	Grados	Min	Seg	Grados	Min	Seg			
PARTE ALTA									
Roque Arenas	7	0	54,4	73	10	37,3	814	7,0150	-73,1769
Teresa Mendoza	7	0	55,2	73	10	39,8	814	7,0153	-73,1777
Fidel Valderrama	7	0	52,7	73	10	47,5	835	7,0146	-73,1799
Familia Galván	7	0	49,6	73	10	44,9	826	7,0138	-73,1791
Gerardo Mantilla	7	0	49,7	73	10	45,5	826	7,0138	-73,1793
Tanque 1	7	0	48,2	73	10	40,6	799	7,0134	-73,1779
Tanque 2	7	0	46,4	73	10	40,3	799	7,0129	-73,1779
Marleny Olarte	7	0	39,4	73	10	45,4	794	7,0109	-73,1793
Bocatoma 1	7	0	34,2	73	10	49,7	792	7,0095	-73,1805
Jesús Vargas	7	1	21,6	73	10	29,8	794	7,0227	-73,1749
Fidel Finao	7	1	26,5	73	10	23,6	803	7,0240	-73,1760
Enrique Mantilla	7	1	26	73	10	59,8	921	7,0239	-73,1833
María Prada	7	1	16,9	73	10	45,2	796	7,0214	-73,1792
José Gómez	7	1	12,1	73	10	33,3	798	7,0200	-73,1759
Familia Rodríguez	7	1	10,4	73	10	48,4	809	7,0196	-73,1801
Alicia Gamboa	7	0	34,1	73	10	57	835	7,0095	-73,1825
Familia Hernández	7	0	41,8	73	10	57,8	806	7,0116	-73,1827
Familia Rueda	7	0	50,7	73	11	11,5	880	7,0141	-73,1865

Tabla 3. Georreferenciación de los habitantes de la parte baja de la vereda

Propietario	North			West			Altura (m)	Latitud	Longitud
	Grado	Min	Seg	Grados	Min	Seg			
PARTE BAJA									
Ismael Mendoza	7	0	38,8	73	10	23,6	756	7,0108	-73,1732
Alfonso Mendoza	7	0	42,8	73	10	28,5	771	7,0117	-73,1744
Familia Mendoza	7	0	41,2	73	10	24,3	761	7,0114	-73,1733
Alcides Santos	7	0	46,5	73	10	25,1	762	7,0128	-73,1736
Opertino Celis	7	0	46,4	73	10	26,1	764	7,0128	-73,1739
Ernesto Pinto	7	1	6,8	73	10	28,3	768	7,0183	-73,1744
José Gómez	7	1	5,1	73	10	28,3	773	7,0181	-73,1744
Fredy Bonilla	7	1	10,1	73	10	23,4	767	7,0194	-73,1736
Familia Reyes	7	1	10,2	73	10	25,1	768	7,0194	-73,1736
Josefa Vega	7	1	24,5	73	10	18,4	770	7,0233	-73,1717
Jairo Gonzales	7	1	24,8	73	10	16,1	763	7,0233	-73,1711
Gonzalo Hernández	7	1	28,7	73	10	22	777	7,0244	-73,1728
Carlos Ortiz	7	1	5,6	73	10	22,7	762	7,0181	-73,1728
William Valdivieso	7	1	1,5	73	10	23,8	763	7,0169	-73,1731
Raúl Pinilla	7	1	1,4	73	10	19,4	757	7,0169	-73,1719
Familia Mendoza	7	0	57,4	73	10	24,1	763	7,0158	-73,1733
Gonzalo Hernández	7	0	58,7	73	10	27,8	772	7,0161	-73,1742
Omar	7	0	52	73	10	8,1	751	7,0144	-73,1717
Familia Pérez	7	0	47,9	73	10	10,2	754	7,0131	-73,1694
Carlos Ramírez	7	0	51,9	73	10	8,1	751	7,0142	-73,1689
Wilson Celis	7	0	55,1	73	10	5,8	750	7,0158	-73,1681
Familia Valderrama	7	0	53,6	73	10	19,8	757	7,0147	-73,1719
Santiago Flórez	7	0	50,7	73	10	34,2	778	7,0139	-73,1761
Bocatoma2	7	0	40,5	73	10	33,2	780	7,0111	-73,1753
Pavicol	7	1	16,9	73	10	0,3	746	7,0211	-73,1667
Captación Distrito	6	59	9,1	73	10	22,2	822	6,9858	-73,17278

Por conveniencia, también se hizo por medio del software Google Earth, un trazado de todos los puntos con sus respectivas coordenadas para corroborar que todos los datos compilados en la tabla 2 y 3 tenían relación con la realidad. Adicionalmente, se hizo con el fin de tener una panorámica de la cobertura y estimar todas las variables de distancia referentes entre

bocatomas a reservorios y ver en donde se encontraban ubicados los individuos a los cuales no gozaban del beneficio del distrito de riego actual; siendo así, se presentan a continuación el esquema final del censado de la vereda y un mapa de curva de niveles hecho en el software gratuito MapSource donde se puede apreciar de forma más sencilla las alturas de los puntos.

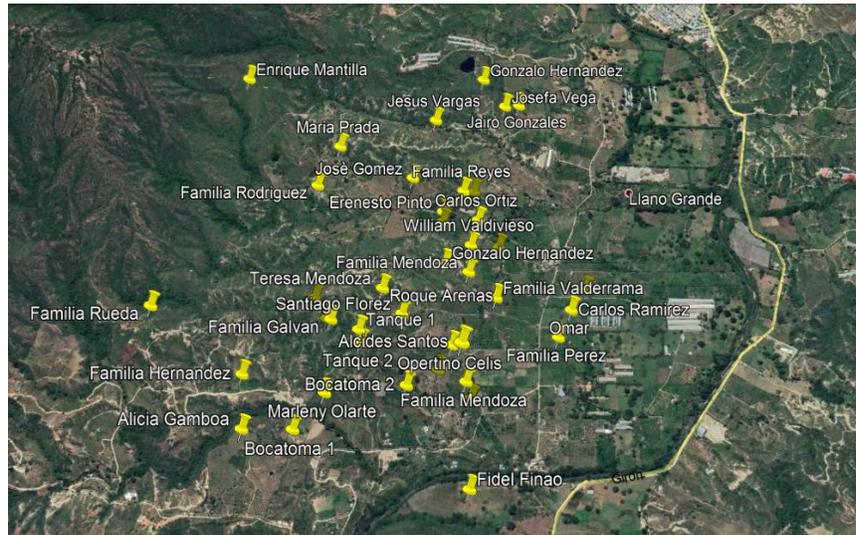


Ilustración 16. Mapa en Google Earth de la vereda Llano Grande

En la ilustración 17 se puede evidenciar que las alturas provenientes del sistema de georreferenciación utilizado, están acorde a las curvas de nivel del terreno en estudio, las alturas oscilan entre los 700 y 900 metros sobre el nivel de mar; de esta manera, se encuentra pertinente trabajar con las alturas y distancias exactas procedentes del Google Earth para los cálculos del dimensionado hidráulico.

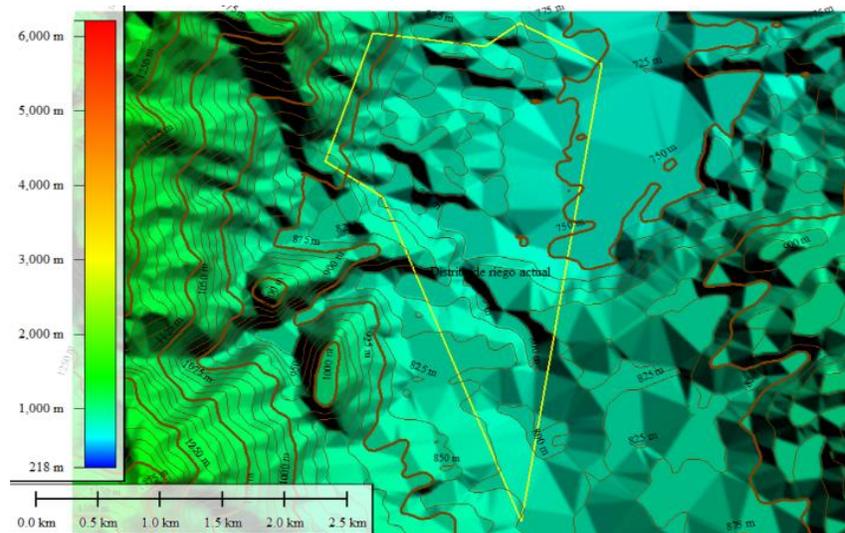


Ilustración 17. Curva de nivel de la vereda Llano Grande

7.2.2. Caracterización De Cultivos

De acuerdo a la metodología planteada, se procedió a realizar una caracterización pertinente de las áreas cultivadas y tipos de cultivos, por lo que fue necesario efectuar una encuesta a todos los finqueros y la única manera de encontrar a todos estos fue estar presentes en una reunión de junta de acción de la vereda que se realiza todos los últimos viernes de cada mes en el colegio de esta localidad.

Dicha reunión y toma de datos a través de la encuesta, se realizó el 29 de Noviembre del 2019, gracias a un espacio que se obtuvo en el comité de agricultores, donde se intervino con una descripción general del proyecto, y todos los presentes en el lugar colaboraron llenando el sondeo. Esta encuesta constó de seis preguntas puntuales, las cuales eran: Nombre de la persona encuestada, ¿Qué tipo de cultivos maneja?, ¿Cuál es el área total de su finca?, ¿Cuál es el área cultivada por cada cultivo?, ¿Cuenta con un sistema de bombeo para riego? y ¿Cuál sistema de riego usa?.

Al finalizar, se tuvo lo esperado, 39 encuestas diligenciadas que hacían referencia a la cantidad exacta de fincas de toda la vereda de Llano Grande. La respuesta de las preguntas planteadas en la pesquisa se muestran a continuación:

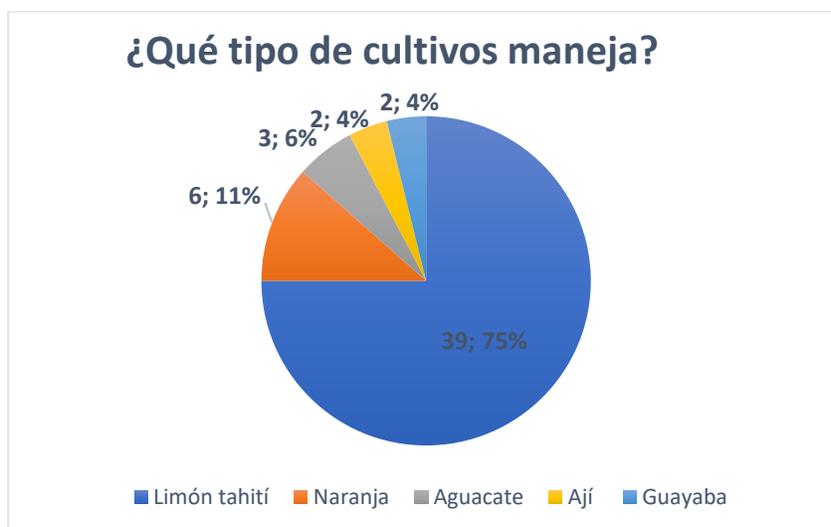


Ilustración 18. Tipos de cultivos que se manejan en la vereda

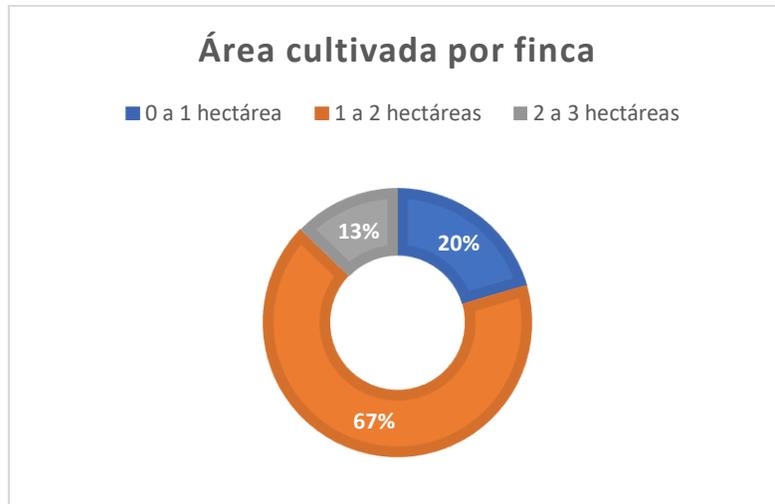


Ilustración 19. Cantidad de área cultivada por finca

De acuerdo a las gráficas presentadas en las ilustraciones 18 y 19 , se puede inferir que el tipo de cultivo que más se practica en la zona es el limón tahití y por otro lado, que la mayoría de las personas cuentan en gran porcentaje con áreas cultivadas de 1 a 2 hectáreas.

Se consideraron necesarios estos datos para la toma de decisiones en el momento de calcular las necesidades netas de riego, puesto que cada tipo de cultivo conlleva a diferentes demandas de agua y se realizó de estandarización del consumo de agua; lo mismo se hizo con la cantidad de hectáreas cultivadas por cada finca, debido a las especificaciones establecidas por la entidad gubernamental pertinente.

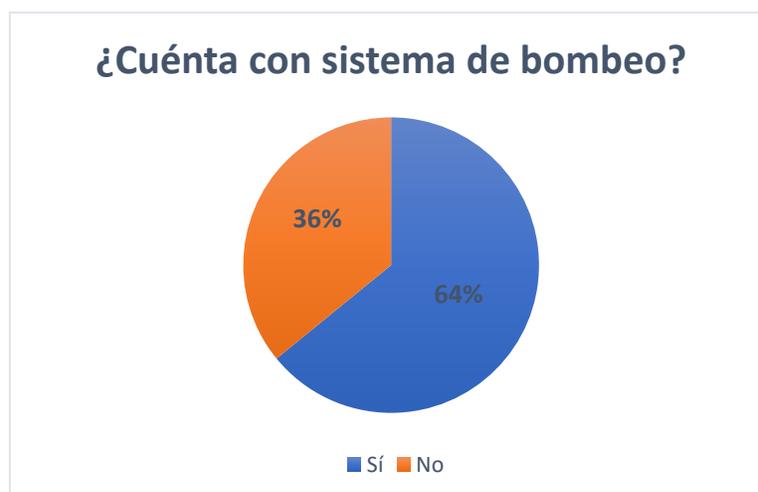


Ilustración 20. Porcentaje de personas que bombean

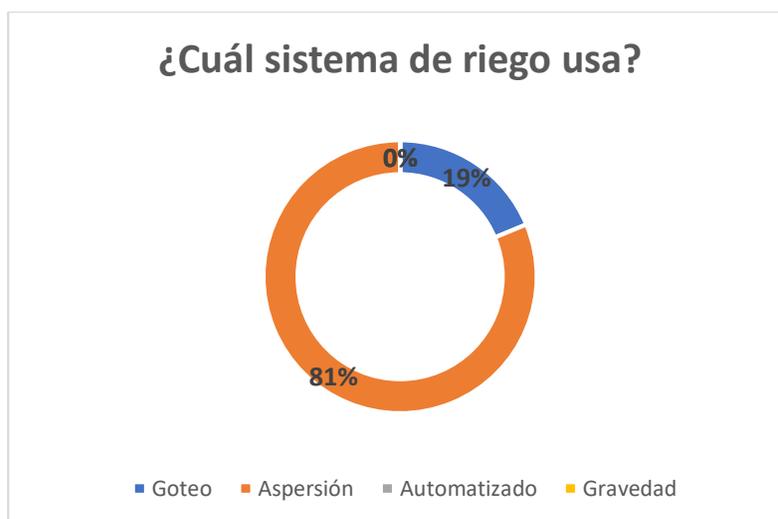


Ilustración 21. Tipo de sistema de riego que se utiliza para los cultivos

Acorde a la información de la ilustración 20 y 21, se deduce que más del 80 por ciento de los habitantes utilizan como método de riego el sistema de aspersión, siendo nulo el porcentaje de personas que utilizan el sistema de gravedad o automatizado. De esta manera, el 64% de los finqueros tiene que bombear agua a sus respectivas localidades, siendo de este porcentaje 15 habitantes que no se encuentran asociados al distrito de riego y 10 que sí pertenecen, pero su demanda de agua ha aumentado y se ven obligados a ejecutar bombeo independiente.

7.2.3. Selección De Beneficiarios

Esta sección especifica cuales fueron las personas incluidas en el distrito de riego que se dimensiona. Entonces, en primera instancia, solo se consideraron a los finqueros de la parte alta ya que son los que no reciben nada del recurso hídrico proveniente del distrito, en otras palabras, tienen que suplir el cien por ciento de la demanda de agua para sus cultivos por medio de bombeo independiente desde los jagüeyes hasta sus propiedades.

El segundo filtro para la selección, se basó en verificar cuales de estas personas se verían beneficiadas en un proyecto externo (bombeo solar independiente para una hectárea de cultivo), que se venia realizando de forma paralela con este en el cual se encontraron tres personas que cumplían con esto, por lo tanto los propietarios fueron inmediatamente descartados en esta etapa.

Finalmente, se hizo un análisis de localizaciones para determinar el lugar óptimo para la ubicación del reservorio, y con respecto a este, seleccionar las fincas más cercanas, con menor altura que la cota del tanque y con ubicación favorable para el recorrido de tuberías,

descartando así las que no cumplían con estas especificaciones, por lo tanto, dos propietarios quedaron fuera de la selección. De esta manera, se obtuvo el mapa mostrado en la ilustración 22 donde se encuentran las propiedades escogidas y la botacoma para los cálculos hidráulicos.

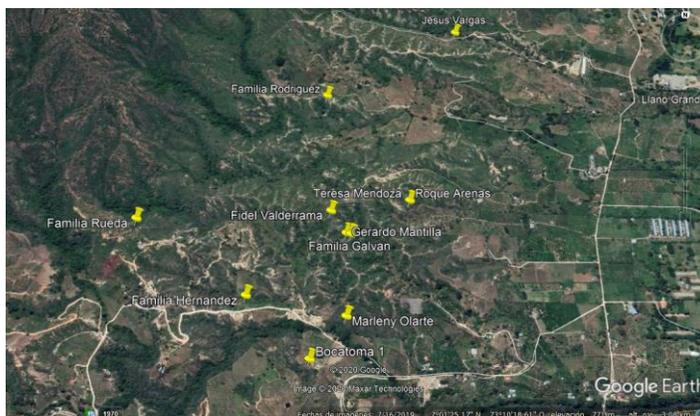


Ilustración 22. Mapa de los habitantes seleccionados para el proyecto

7.3. CÁLCULOS DE CONSUMO DE AGUA POR CULTIVO

De acuerdo con la metodología planteada, en este capítulo se especifican las estimaciones de las necesidades netas de riego por hectárea. Inicialmente se procedió a extraer información de antecedentes de radiación solar diaria durante un año, temperatura mínima (Tmin) y máxima (Tmax) por mes y la precipitación mensual de la zona, todo esto con el fin de poder calcular principalmente el caudal diario que se requiere llevar a los beneficiarios. Se escogió la base de datos de la NASA debido a que presentan datos actualizados y del sitio de estudio en específico. Adicionalmente se consultó una publicación realizada por el IDEAM [18] y en esta no se presentan datos exactos de la zona (Llano Grande) por lo que se descartó. A continuación se muestra lo obtenido de la base de la NASA con respecto a la radiación solar y temperatura en Llano Grande.

Tabla 4. Radiación solar por mes en la vereda Llano Grande

Mes	Radiación [kWh/m ² *mes]	Promedio diario
ene-19	153,84	4,9625
feb-19	166,89	5,9603
mar-19	167,95	5,4177
abr-19	138,98	4,6326
may-19	153,19	4,9416
jun-19	149,95	4,9983
jul-19	169,70	5,4741
ago-19	178,24	5,7496
sep-19	155,25	5,1750
oct-19	161,22	5,2006
nov-19	134,51	4,4836
dic-19	175,50	5,6612
Total	1905,22	5,2214

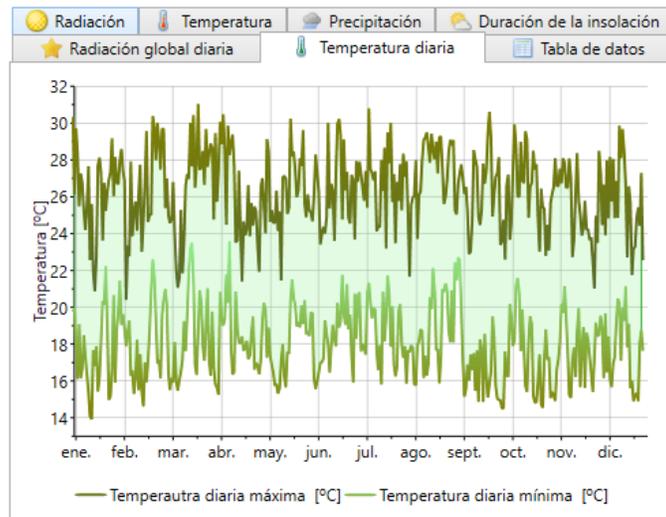


Ilustración 23. Temperatura máxima y mínima en la vereda Llano Grande

Tomado de Base de datos de la NASA

Tabla 5. Precipitación mensual en la vereda Llano Grande

Mes	Precipitación [mm/mes]
ene-19	66,48
feb-19	3,44
mar-19	186,72
abr-19	194,25
may-19	166,07
jun-19	54,66
jul-19	111,50
ago-19	81,69
sep-19	124,89
oct-19	248,33
nov-19	125,71
dic-19	21,14

En el primer paso, se realizaron los respectivos cálculos de la radiación solar incidente de la zona, siguiendo la ecuación 1. Se consideró un coeficiente K_T de 0,162 por ser una región no costera y la radiación solar extraterrestre se tomó de una interpolación para 7 grados de latitud de las tablas del anexo 1, por lo tanto se tiene para el mes de enero del 2019 que:

$$R_s = R_0 * K_T * (T_{max} - T_{min})^{0,5}$$

$$R_s = 13,6 * 0,162 * (30,2 - 16,2) = 8,2436 \frac{mm}{día}$$

Procedente a esto, se estimó la evapotranspiración potencial diaria del lugar con la ecuación 2, donde se tuvo que calcular en primer instancia la temperatura promedio entre la mínima y la máxima, obteniendo lo siguiente para el mismo mes de enero del 2019:

$$ET_0 = 0,0135 * (T_{med} + 17,78) * R_s$$

$$ET_0 = 0,0135 * (23,5 + 17,78) * 8,243 = 4,561 \frac{mm}{día} = 136,819 \frac{mm}{mes}$$

Seguidamente con el valor de la evapotranspiración calculado, se tiene que cuantificar la evapotranspiración del cultivo siguiendo la ecuación 3 FAO porque la precipitación total de ningún mes superan los 250 mm para utilizar la ecuación 4, en lo que corresponde lo siguiente para el mismo mes de ejemplo:

$$P_e = (125 - 0,2 P_m) * \frac{P_m}{125}$$

$$P_e = (125 - (0,2 * 66,48)) * \frac{66,48}{125} = 59,4086 \frac{mm}{mes}$$

Para el cuarto paso, se cuantificó la evapotranspiración del cultivo de limón por las razones mencionadas en el capítulo 5, teniendo en cuenta las variables de Kc presente en el anexo 2 y la evapotranspiración potencial mensual (Eto) calculada que conforman la ecuación 5; el resultado para el mes de enero fue el siguiente:

$$ET_c = ET_0 * K_c$$

$$ETc = 136,819 * 0,68 = 93,04 \frac{\text{mm}}{\text{mes}}$$

Finalmente, se calculan las necesidades netas de riego para el cultivo de limón siguiendo la ecuación 6, considerando que se va a suplir los requerimientos de una hectárea de este.

$$NR = ETc - Pe$$

$$NR = \left(93,04 \frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right) - \left(59,4086 \frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right) = 33,63 \frac{\text{mm}}{\text{mes}}$$

Cabe resaltar que se realizó el mismo procedimiento del mes de enero para los cálculos de los meses restantes.

Tabla 6. Cálculos de evapotranspiración y precipitación efectiva

Mes	Tmax [°C]	Tmin [°C]	Tprom [°C]	Ro [mm/día]	KT	Rs [mm/día]	Eto [mm/día]	Eto [mm/mes]	Precipitación total [mm/mes]	Precipitación Efectiva [mm/mes]
Enero	30,2	16,2	23,2	13,6	0,162	8,244	4,561	136,819	66,48	59,408
Febrero	29	14,3	21,65	14,5	0,162	9,006	4,794	143,821	3,44	3,421
Marzo	31	16	23,5	15,25	0,162	9,568	5,332	159,965	186,72	130,937
Abril	30,3	15	22,65	15,35	0,162	9,727	5,309	159,268	194,25	133,877
Mayo	30	15,6	22,8	15	0,162	9,221	5,052	151,550	166,07	121,943
Junio	30,3	15,8	23,05	14,7	0,162	9,068	4,998	149,951	54,66	49,879
Julio	31	16	23,5	14,8	0,162	9,286	5,175	155,245	111,5	91,608
Agosto	29	15,8	22,4	15,15	0,162	8,917	4,837	145,104	81,69	71,012
Septiembre	30,5	14,2	22,35	15,2	0,162	9,942	5,386	161,576	124,89	99,934
Octubre	30	14,3	22,15	14,6	0,162	9,372	5,052	151,556	185,3	130,362
Noviembre	28,2	15	21,6	13,75	0,162	8,093	4,302	129,073	125,71	100,425
Diciembre	29,7	15	22,35	13,4	0,162	8,323	4,509	135,270	21,14	20,425

Tabla 7. Necesidades netas de riego para el limón por mes

Necesidades netas de riego por hectárea[mm/mes]													
CULTIVO	Kc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Limón	0,68	33,63	94,38	0	0	0	52,09	14	27,7	9,938	0	0	71,56
m ³ /díax10Hect		112,1	314,6	0	0	0	173,6	46,5	92,2	33,13	0	0	238,53

7.4. DIMENSIONADO DEL SISTEMA HIDRÁULICO

En este capítulo se mencionan las especificaciones del dimensionado hidráulico del proyecto para la alternativa de bombeo en DC y para la correspondiente en bombeo en AC, el cual cuenta con un proceso de selección de bomba y número de estas, cálculo de pérdidas por tubería, cálculo de altura neta de aspiración y el momento de descarga desde el tanque central hasta los puntos específicos de cada usuario seleccionado y demás variables con el objetivo de detallar puntualmente los datos obtenidos.

7.4.1. Selección De Bomba En Dc

En esta etapa del proyecto, se parte del hecho de elegir una bomba que funcione en corriente continua como primera alternativa, ya que al no trabajar a una potencia nominal todo el tiempo, tienen la posibilidad de trabajar a cualquier potencia que se le esté entregando desde los paneles y de esa forma evitar completamente la dependencia de la red y así mismo disminuir el presupuesto del proyecto. Siendo así, se realizó una búsqueda de bombas en DC que cumplieran las especificaciones del mes con mayor caudal (febrero) y de altura, encontrándose el inconveniente que todas las bombas que funcionan con este tipo de corriente trabajan a bajos caudales con grandes alturas o con grandes caudales pero con pequeñas alturas, considerando que se requería una cantidad considerable de flujo de agua cuantificada en 314,59m³/día, y elevar el fluido a 88 metros de altura, se decidió trabajar con dos sistemas de bombeo en paralelo idénticos, desde la bocatoma hasta el reservorio con el objetivo de dividir en la mitad los caudales y encontrar un arreglo más eficiente de bombas comerciales en DC.

Tabla 8. Caudal para cada sistema en paralelo en DC para las 5.96 HSP

Caudal para cada sistema	7,3310	L/seg
	439,86	L/min
	0,00733	m ³ /seg
	26,3917	m ³ /hora
	0,43986	m ³ /min

A continuación se muestra la bomba DS3000-60-17 de la compañía Kesheng, las especificaciones se muestran en el anexo 4. Esta trabaja a valores máximos de potencia de 3000W, flujo de 55 m³/hora y altura de 25 metros.



Ilustración 24. Bomba solar DS3000-60-17 Kesheng

Tomado de Catálogo de bombas solares de la compañía Kesheng

Adicionalmente, se procedió a obtener la ecuación característica de la bomba. Para esto se utilizó inicialmente el programa CurveExpert Professional para tomar puntos de referencia con la información estipulada en el catálogo del fabricante, con las especificaciones técnicas de la bomba encontradas en el Anexo 4, con el objetivo de demostrar teóricamente que se cumple con la bomba los requerimientos de altura y caudal. No obstante, con la información de la ilustración 25 no es suficiente para determinar la correcta selección de la bomba debido a que primero se debe graficar la curva del sistema de tubería y así proceder a cuantificar el número de bombas que se necesitan sean en serie o en paralelo para finalmente verificar el cumplimiento de los requerimientos del dimensionado.

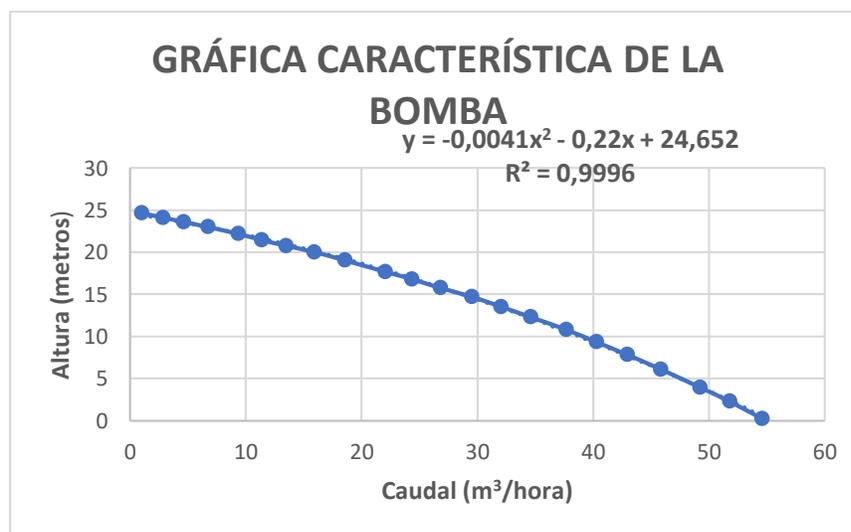


Ilustración 25. Gráfica característica de la bomba DS 3000-60-17

Como se puede observar, se seleccionó esta bomba en específico porque cumple de una vez con la demanda del flujo para un sistema independiente ($26,4\text{m}^3/\text{hora}$) y solo hace falta estimar el número de bombas que se necesitan en serie en el mismo sistema para alcanzar la altura necesitada.

7.4.2. Ecuación De La Tubería Para Bombeo En Dc

En esta sección se explican los pasos que se siguieron para obtener la ecuación de la tubería para la primera alternativa del sistema de bombeo en corriente continua. Se partió de seleccionar una tubería comercial de PVC de 4 pulgadas de diámetro pues es la magnitud correspondiente a la entrada y salida de la bomba DS 3000-60-17. A continuación se establecieron variables independientes para graficar la ecuación, las cuales son las siguientes:

Tabla 9. Variables independientes para el cálculo de la ecuación de la tubería

DATOS		
Altura	88	metros
L Impulsión	820	metros
L Aspiración	3	metros
Caudal	0,0073	m^3/seg
Viscosidad	0,00083	$\text{kg}/\text{m}^*\text{seg}$
Diámetro interno	0,1055	metros
Gravedad	9,8	m/seg^2
Densidad	998	kg/m^3
Rugosidad PVC	0,0000015	metros

El valor de la altura de la tabla 9, proviene de la diferencia de este parámetro que se encuentra en la tabla 2, entre los puntos bocatoma 1 y el punto nombrado Familia Rueda, obteniendo así una altura por transportar el fluido de 88 metros. Adicionalmente, la longitud de impulsión se tomó a través del software Google Earth (Anexo 5) que mide distancias del suelo entre dos puntos y por último el diámetro interno y la rugosidad son propiedades específicas del material de la tubería.

De esta manera, se procedió a calcular las pérdidas en el momento de aspiración y en el momento de impulsión, para esto se realizaron dichas estimaciones por separado, partiendo desde el procedimiento de cuantificar el número de Reynolds (Ecuación 8) para así obtener el factor de fricción de Darcy a través de la Ecuación 11 ya que los valores del Reynolds superaban los 2000. Luego de esto, se calculó la longitud equivalente de singularidad para un codo de 90 grados para un diámetro de 105,52 mm utilizando la información del Anexo 3, los datos mencionados se muestran a continuación:

Tabla 10. Fricción en los momentos de aspiración e impulsión para bombeo en DC

TUBERÍA DE PVC COMERCIAL DE 4 PULGADAS					
FRICCIÓN IMPULSIÓN			FRICCIÓN ASPIRACIÓN		
Velocidad IMP	0,83831	m/seg	Velocidad imp	0,83831	m/seg
Reynolds	84246,5634	-	Reynolds	84246,5634	-
Rugosidad Rel	1,4215E-05	-	Rugosidad Rel	1,4215E-05	-
Factor Fricción	0,01268	-	Factor Fricción	0,01268	-
Pérdida Codo	3,46408	Long Equiv.	Pérdida Codo	3,46408	Long Equiv.

Teniendo los datos de la tabla 10 es posible calcular las pérdidas aproximadas por tubería del sistema de forma numérica con la ecuación 9, sin embargo se utilizó la definición matemática de la ecuación 14 para obtener con mayor precisión en las pérdidas por fricción en la tubería teniendo en cuenta los accesorios y los resultados fueron los siguientes:

Tabla 11. Pérdidas por tubería por bombeo en DC

IMPULSIÓN			ASPIRACIÓN		
Diámetro	0,10552	metros	Diámetro	0,10552	metros
Radio	0,05276	metros	Radio	0,05276	metros
Área	0,0087449	metros ²	Área	0,008744	metros ²
Codos	3		Codos	1	
Longitud	820	metros	Longitud	2	metros
Sum k	12,7977		Sum k	5,46408	
Pérdidas	3,532219	metros	Pérdidas	0,008615	metros
i	74252,0368		i	3801,9572	
Pérdidas T	3,54083476		metros		
Sumatoria i	78053,9941		-		

Observando la tabla 11, inmediatamente se puede inferir que las pérdidas de carga hidráulica rodean entre los 3 a 4 metros según el método numérico. Sin embargo, fue necesario graficar la curva del sistema de tubería para verificar las pérdidas por este método y definir inmediatamente el número de bombas de la referencia seleccionada que cumplan con el último parámetro que hace falta, que es el de alcanzar la altura requerida de bombeo. Es importante mencionar que la sumatorias de k que aparece en la tabla 11, hace referencia a las longitudes equivalentes de cada accesorio en el sistema de tubería, es decir, para la impulsión se le agregaron los coeficientes de longitud equivalente de una válvula de cheque para evitar el retorno del fluido y para la aspiración, se le agregó el de una válvula de alcachofa.

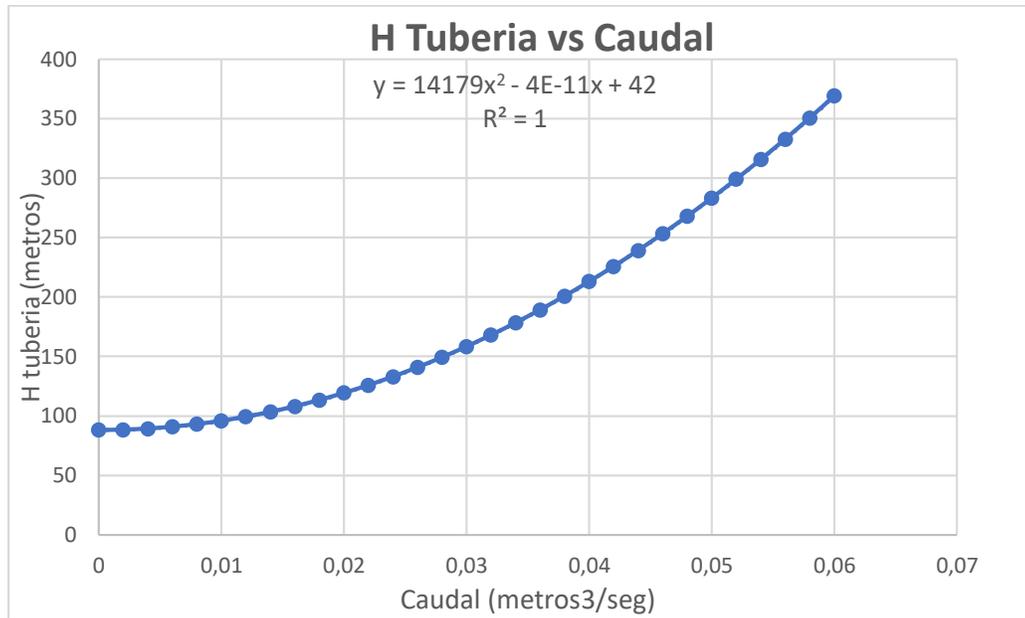


Ilustración 26. Ecuación de la tubería para bombeo en DC

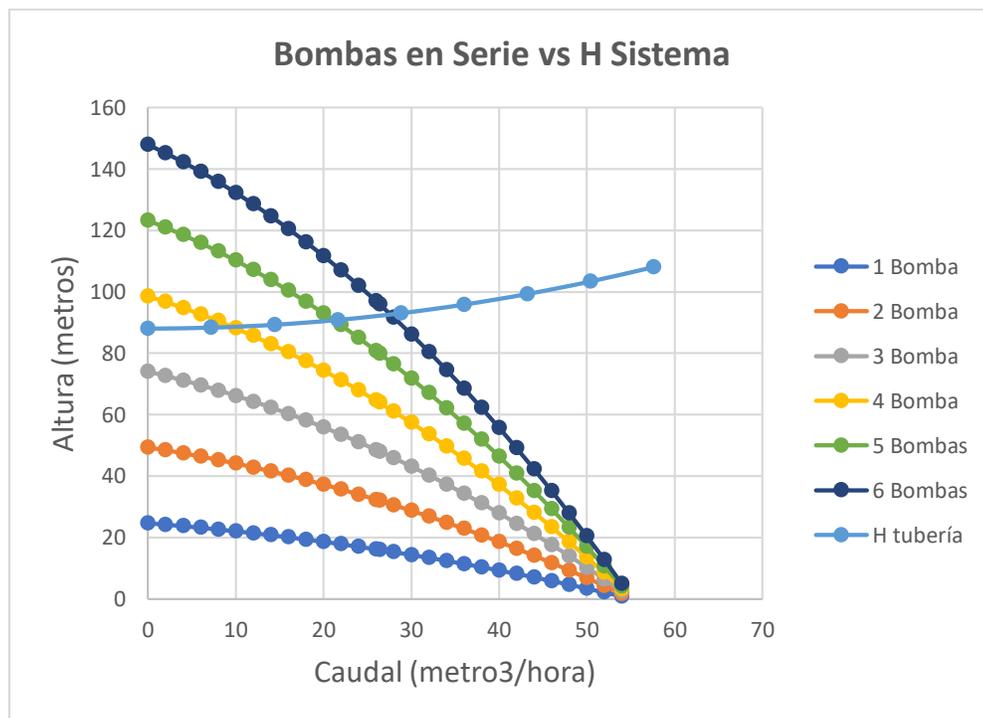


Ilustración 27. Ecuación de la tubería y bombas en serie requeridas en DC

Cabe resaltar que para realizar el gráfico de las bombas en serie, fue necesario multiplicar la ecuación característica de la bomba mostrada en la ilustración 25 por la cantidad de bombas que se le iban agregando en serie hasta alcanzar el valor de la altura que se necesitaba cumplir.

Teniendo en cuenta la ilustración 27, se puede deducir que se necesitan 6 bombas idénticas de la misma referencia para suplir la demanda de flujo y de altura del proyecto, sin embargo, en el Anexo 6 se encuentra la tabla que evidencia el valor exacto de altura que se llegaría a alcanzar con este mismo sistema de tubería y con la misma cantidad de bombas en serie.

7.4.3. Selección De Bomba En Ac

Partiendo del hecho que existe una mayor disponibilidad de tecnologías de sistemas de bombeo para grandes caudales y alturas que trabajan en corriente alterna, es habitual encontrarse con dispositivos que con solo una unidad de este sea capaz de cumplir con los requerimientos de altura y caudal. Los parámetros de selección, para la bomba comercial en AC, fueron los siguientes:

Tabla 12. Caudal para el sistema de bombeo en AC para 5.96 HSP

Caudal para bombeo en AC	14,662	L/seg
	879,724	L/min
	0,0146	m ³ /seg
	52,782	m ³ /hora
	0,879	m ³ /min

La tabla 12 estipula los valores de caudal que se requieren para esta alternativa de bombeo en AC, debido a que solo se va a trabajar con una tubería para el transporte del agua desde la bocatoma hasta el tanque del proyecto, siendo mayor la magnitud del flujo de agua que se va a transportar por una sola tubería.

De acuerdo con la información mencionada en la tabla 12, se escogió la bomba comercial T1006X4ME30 de la compañía KAWAMOTO Corfort Earth. Esta trabaja a potencia nominal de 30 kW y valores máximos de flujo de 130 m³/hora y altura de 155 metros.



Ilustración 28. Bomba en AC T1006x4ME30

Tomado de Catálogo de bombas centrífugas de KAWAMOTO Confort Earth

De igual forma como se hizo en el apartado de las bombas solares en DC, se procedió a obtener la ecuación característica de la bomba en el software Excel, para esto igualmente se utilizó el programa CurveExpert Professional para tomar los puntos de referencia con la información suministrada por el catálogo del proveedor, con el objetivo que verificar si se cumplen en la siguiente sección con los requerimientos de esta segunda alternativa.

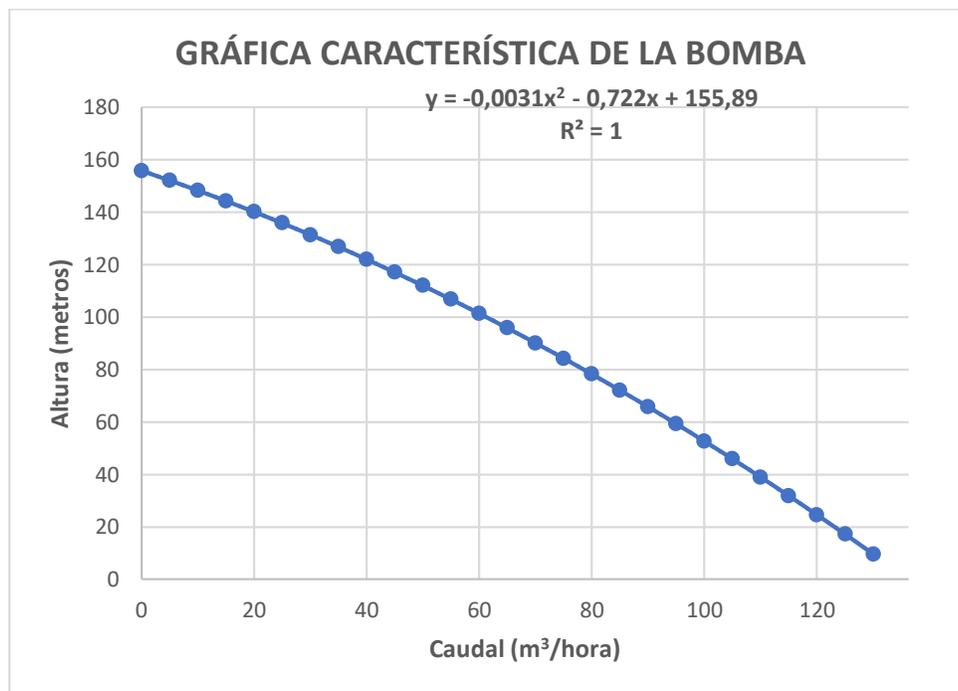


Ilustración 29. Gráfica característica de la bomba T1006x4ME30

Como se puede observar en la ilustración 29, solo es necesario una bomba de esta referencia para alcanzar la altura geométrica requerida, ya que para valores de caudal de 52,78 m³/hora se tiene una altura de 109,14 metros y solo hace falta estimar las pérdidas que provoca el

aumento del caudal para una sola tubería de 4 pulgadas con el fin corroborar la correcta selección de este dispositivo de bombeo.

7.4.4. Ecuación De La Tubería Para Bombeo En Ac

De igual manera, que para el sistema en DC se partió de seleccionar una tubería comercial de PVC de 4 pulgadas puesto que este diámetro corresponde a las medidas de la bomba T1006x4ME30 para la aspiración y la impulsión. Para dicho sistema de tubería se usaron los mismos valores de la tabla 9 con la excepción de que el caudal es el doble ($0,0146\text{m}^3/\text{seg}$), debido a que para la primera alternativa el caudal total del proyecto era bombeado por dos sistemas idénticos como ya se había mencionado y para esta alternativa, todo el caudal necesitado para las 10 fincas es transportado por una única tubería con una única bomba.

De la misma manera, se procedió a calcular las pérdidas tanto para el momento de impulsión como para el momento de aspiración, donde se realizaron la misma metodología que la sección 3.4.2. obteniendo el siguiente resultado:

Tabla 13. Fricción para sistema de bombeo en AC

Tubería de PVC comercial de 4 pulgadas					
Fricción impulsión			Fricción aspiración		
Velocidad IMP	1,6766	m/seg	Velocidad IMP	1,6766	m/seg
Reynolds	212386,294		Reynolds	212386,2944	
Rugosidad Rel	1,42153E-05		Rugosidad Rel	1,42153E-05	
Factor Fricción	0,01268		Factor Fricción	0,01268	
Pérdida Codo	3,46408	Long Equiv.	Pérdida Codo	3,46408	Long Equiv.

Tabla 14. Pérdidas por sistema de tubería para bombeo en AC

Impulsión			Aspiración		
Diámetro	0,10552	metros	Diámetro	0,10552	metros
Radio	0,05276	metros	Radio	0,05276	metros
Área	0,00874	metros ²	Área	0,00874	metros ²
Codos	3		Codos	1	
Longitud	820	metros	Longitud	2	metros
Sum k	12,7977		Sum k	5,46408	
Pérdidas	14,1281	metros	Pérdidas	0,03445	metros
i imp	74248,4		i asp	3801,94	
Pérdidas T		14,1625755			metros
Suma i		78050,4424			-

Finalmente para verificar el cumplimiento de los requerimientos para esta alternativa, se tiene igualmente que sobreponer la gráfica de la tubería con los valores de la tabla 14 y la gráfica de la ilustración 29. Adicionalmente, se tuvieron en cuenta los mismos accesorios que en el sistema de tubería de la alternativa anterior, es decir, se le agregaron los coeficientes de longitud equivalente de válvula de cheque, válvula de pie con filtro y codos y por lo tanto tiene el mismo comportamiento la ecuación de la tubería de la ilustración 26.

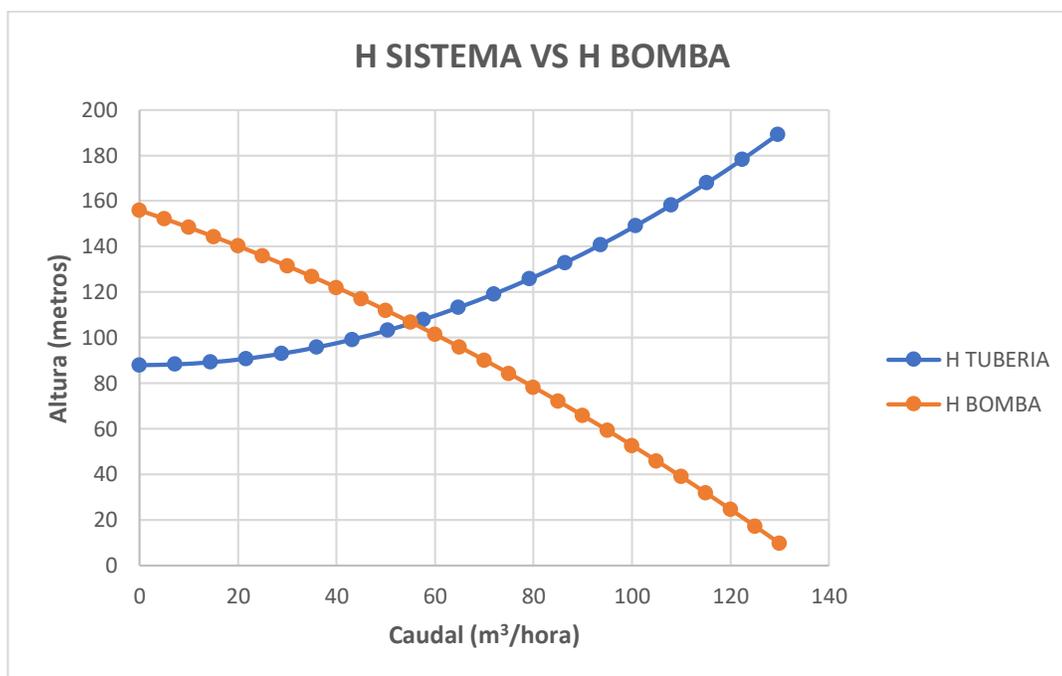


Ilustración 30. Ecuación de la tubería vs ecuación bomba en AC

Teniendo en cuenta la ilustración 30, se demuestra que con una sola bomba de la referencia T1006X4ME30 se logra cumplir con los parámetros de esta alternativa de altura y caudal debido a que el punto de intersección de las dos curvas es 55 m³/hora para caudal y 106,8 metros de altura siendo de esta forma mayor a lo requerido.

7.4.5. Altura Neta Positiva En La Aspiración

Este procedimiento de calcular y obtener los valores de la altura neta positiva en la aspiración (NPSH) fue necesario para definir la altura a la cual se tiene que posicionar la bomba en cualquiera de las dos alternativas en el momento de aspiración para evitar que el dispositivo

de bombeo produzca el efecto de cavitación, de esta forma se utilizaron las ecuaciones 12 y 13 y se obtuvo el siguiente resultado:

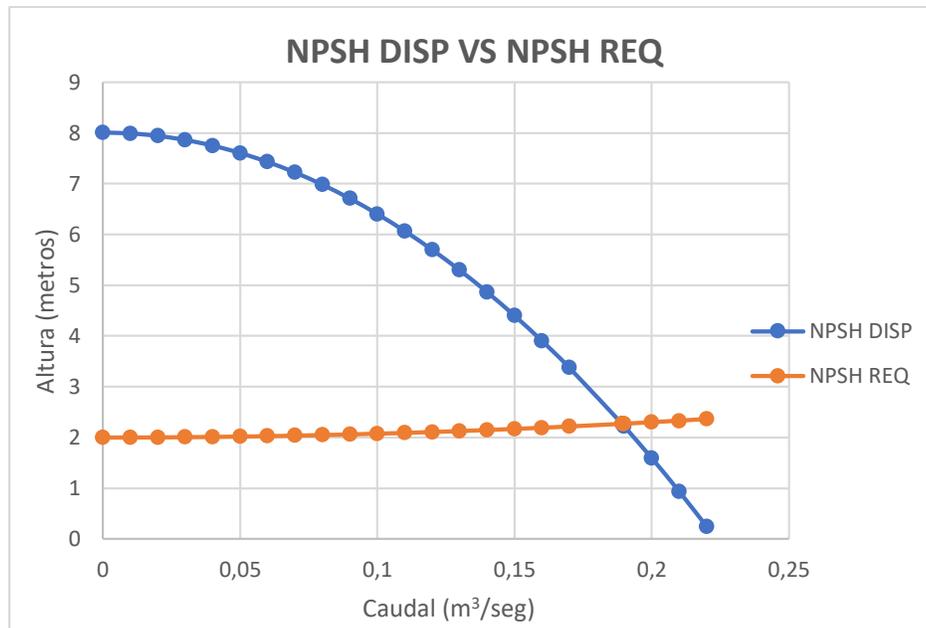


Ilustración 31. NPSH Disponible vs NPSH Requerido para las dos alternativas

Con la intersección de estas dos curvas, se pretende encontrar el punto común de estas dos gráficas para saber en que valor del caudal y altura de aspiración empezaría a presentarse la cavitación en el sistema de bombeo, dado que ninguno de los fabricantes de las bombas seleccionadas daban las curvas de este parámetro. Por lo tanto, teniendo en cuenta la información suministrada en la ilustración 31 y las coordenadas de ambas curvas estipuladas en el Anexo 7, el punto de corte de las dos gráficas es 0,189 m³/seg y 2,265 metros de altura. Sin embargo, el flujo con el cual se está trabajando en el sistema del proyecto para la primera alternativa es de 0,0073 m³/seg, la altura mínima de aspiración son 2 metros y la máxima son 7,99 metros. Para la segunda alternativa que es 0,0146 m³/seg, la altura mínima de aspiración son 2 metros y la altura máxima son 7,97 metros.

Cabe resaltar que la ilustración 31 es válida teóricamente para las dos bombas, dado que todas las variables tales como diámetro de tubería, altura de aspiración geométrica, área y demás datos son los mismos para ambas alternativas; el único dato que está cambiando es el flujo y es para obtener dichas curvas de caudal contra altura.

7.4.6. Red De Distribución De Agua

Esta sección corresponde al drenado del tanque del proyecto hacia los puntos geográficos de los habitantes seleccionados con su respectivo caudal (sin importar si se toma la alternativa de bombeo en corriente directa o corriente alterna), de esta forma se dimensionaron dos tuberías principales con cinco ramales cada una (en total las 10 fincas que se mencionaron en secciones anteriores). Se escogieron dichas tuberías principales por dos razones, la primera es el costo debido a su diámetro ya que si se envía todo el fluido por un mismo ducto, se necesitaría una tubería con mayor diámetro y se elevaría el presupuesto; la segunda consiste en el posicionamiento disperso de las fincas a las cuales se les va a llevar el agua implicando de esta manera, agregar una mayor cantidad de accesorios y tramos de tubería al ducto principal.

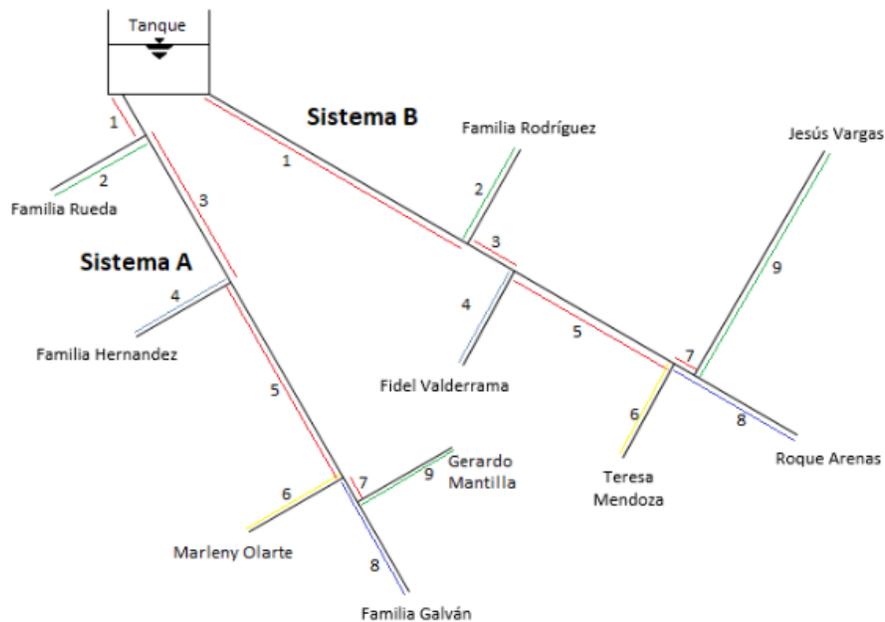


Ilustración 32. Esquema del sistema de drenado de agua

Se realizó un esquema de la red de distribución de agua para el cultivo, esta vez mostrando las dos tuberías principales que se mencionaron con anterioridad; se procedió a llamar Sistema A (Usuarios: Familia Hernández, Familia Rueda, Marleny Olarte, Familia Galván y Gerardo Mantilla) el tramo de la parte izquierda de la ilustración 32 y de la misma manera, el tramo restante de red de distribución ubicada al lado derecho de la imagen se le denominó Sistema B (Usuarios: Familia Rodríguez, Fidel Valderrama, Teresa Mendoza, Roque Arenas y Jesús Vargas).

Luego de tener los usuarios definidos para cada tubería principal, se realizó una división de secciones entre los anteriormente definidos Sistemas con el fin de encontrar un diámetro comercial óptimo (pérdidas considerablemente pequeñas y bajos costo de tubería por su diámetro) para el transporte del agua. De esta manera, para el cálculo del factor de fricción de Darcy se utilizó nuevamente la ecuación 11 por el número de Reynolds que se presentaba en cada tramo de los sistemas y consecutivamente para la estimación de las pérdidas de cada tramo se empleó la ecuación 14 .

Con respecto al caudal utilizado en cada parte de ambos sistemas, este variaba depende del recorrido de la tubería principal y del número de extensiones que se le hubieran agregado a la red de distribución. Entonces, para los tramos 2,4,6,8 y 9 del sistema A y del sistema B el caudal es el mismo ya que es el último recorrido de ducto para llegar hasta las propiedades de los beneficiarios.

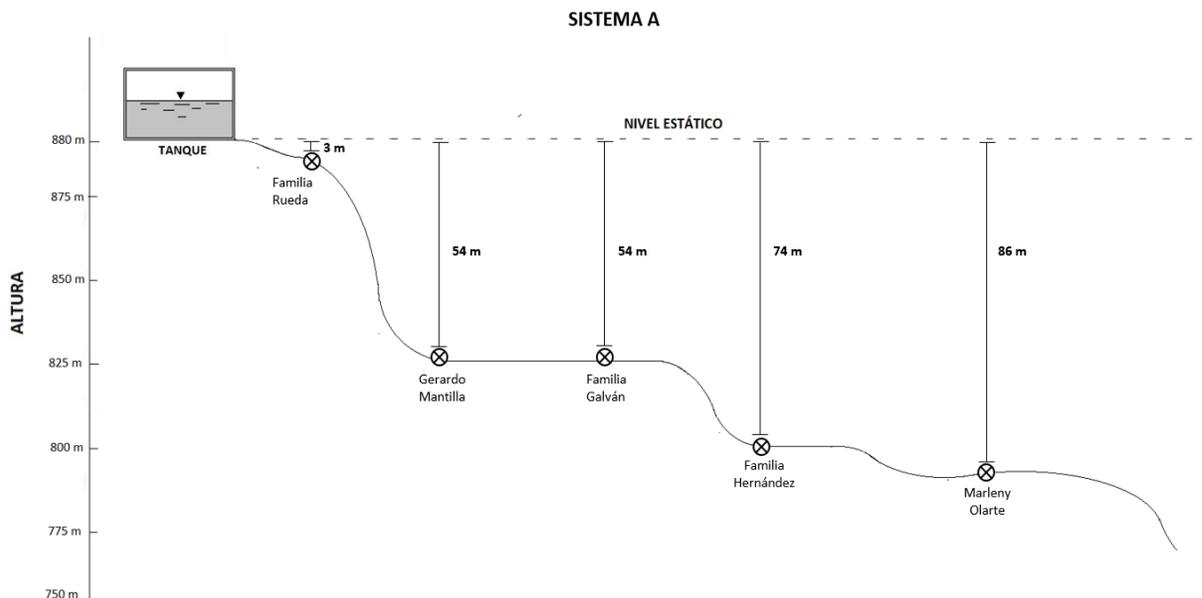


Ilustración 33. Salto entre el tanque y los beneficiarios del sistema 1

De esta manera, el flujo utilizado para ambos sistemas en la sección 7 es la suma del caudal de los tramos 8 y 9. El caudal de la sección 5, es la suma de los los caudales que pasan por el tramo 6 y la sección 7. El flujo que atraviesa por la sección 3, es la suma del tramo 4 y la sección 5; y por último el caudal de la sección 1, es la suma de los flujos del ramal 2 y el tramo 3.

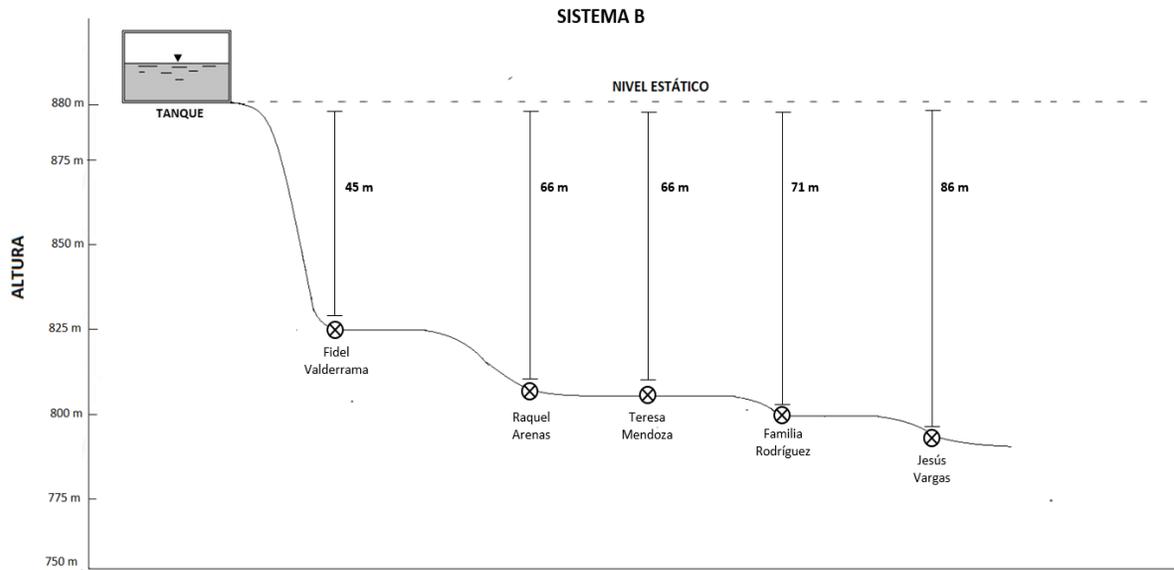


Ilustración 34. Salto entre el tanque y los beneficiarios del sistema 2

Consecutivamente se realizaron las estimaciones pertinentes para un mismo diámetro de una pulgada en todo el recorrido de los dos sistemas; seguido a lo anterior, se procedió a la variación mencionada de diámetros con medidas comerciales de este para seleccionar el diámetro apropiado para cada ramal y para las tuberías principales. Siendo así, en la tabla que se muestra a continuación se encuentran presentes las medidas del diámetro para cada sección de los sistemas:

Tabla 15. Diámetros comerciales para el sistema A en la red de distribución

Diámetros en el sistema A		
Sección	Diámetro	Pérdidas [m]
Tramo 1 - Sistema A	3"	0,2197
Ramal 2 - Sistema A	1,1/4"	0,4400
Tramo 3 - Sistema A	3"	6,7142
Ramal 4 - Sistema A	1"	20,588
Tramo 5 - Sistema A	3"	2,7571
Ramal 6 - Sistema A	1"	21,6316
Tramo 7 - Sistema A	3"	0,004
Ramal 8 - Sistema A	2"	1,333
Ramal 9 - Sistema A	2"	0,5031

Tabla 16. Diámetros comerciales para el sistema B en la red de distribución

Diámetros en el sistema B		
Sección	Diámetro	Pérdidas
Tramo 1 - Sistema B	3"	13,3788
Ramal 2 - Sistema B	1,1/4"	20,7465
Tramo 3 - Sistema B	3"	1,632
Ramal 4 - Sistema B	2, 1/2"	0,3474
Tramo 5 - Sistema B	3"	1,5192
Ramal 6 - Sistema B	1, 1/4"	9,108
Tramo 7 - Sistema B	3"	0,004
Ramal 8 - Sistema B	1,1/4"	9,2796
Ramal 9 - Sistema B	1,1/4"	35,9922

Adicionalmente se calcularon las pérdidas lineales (sin tener en cuenta los accesorios) en cada tramo explícito en los Anexos 9 y 10, con el fin de más adelante tenerlos en cuenta para los cálculos de la presión con la cual se llega a cada punto. Teniendo los diámetros definidos de cada tramo para ambos sistemas de tubería, se continuó con la estimación de las pérdidas de carga hidráulica por accesorios (usando los coeficientes de Longitud Equivalente del Anexo 3), obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 17. Accesorios en el sistema 1 de la red de distribución de agua

SISTEMA A	
Accesorio	Pérdidas [m]
Tee Fam. Rueda	0,0221
Tee Fam. Hernández	0,0765
Tee 3 Marleny O.	0,0456
Tee 4 Gerardo M.	0,0221
Válvula Fam. Rueda	0,3357
Válvula Fam. Hernández	0,8542
Válvula Marleny O.	0,8542
Válvula de Gerardo M.	0,0800
Válvula Fam. Galván	0,0343
Reducción Fam. Rueda	$9,65 \times 10^{-5}$
Reducción Fam. Hernández	0,0166
Reducción Marleny O.	0,02924
Reducción Gerardo M.	0,0001

Tabla 18. Accesorios en el sistema 2 de la red de distribución de agua

SISTEMA B	
Accesorio	Pérdidas [m]
Tee 1 Fam. Rodríguez	0,1143
Tee 2 Fidel V.	0,0765
Tee 3 Teresa M.	0,0456
Tee 4 Jesús V.	0,0221
Válvula Fam. Rodríguez	0,3357
Válvula Fidel V.	0,0343
Válvula Teresa M.	0,3357
Válvula Jesús V.	0,3357
Válvula Roque A.	0,3357
Reducción Fam. Rodríguez	0,0004
Reducción Fidel V.	0,0220
Reducción Teresa M.	0,0033
Reducción Jesús V.	0,0095

Adicionalmente, a cada usuario se le debe proporcionar una presión entre 2,5 y 3 bares en el ramal que llega hasta su ubicación, ya que es el valor con el cual trabajan la mayoría de aspersores que ellos utilizan; para la revisión de esta variable se va a implementar válvulas de control de presión en cada punto de llegada de ramales de tuberías con su respectivo manómetro.

Finalmente, con las pérdidas mencionadas en las tablas 17 y 18, se procede a calcular la presión manométrica que llegaría a final de cada punto con la ecuación 15, teniendo en cuenta la diferencia geométrica del tanque y el punto, además de restarle las las pérdidas expresadas en la tabla 15, 16, 17 y 18 de su respectivo tramo:

Tabla 19. Presión para cada punto del sistema 1

Lugar	Pérdidas	Altura geométrica	Dif. De altura	Altura con pérdidas	Presión (Kpa)	Presión bar
Familia Rueda	1,02	865	15	13,98	136,75	1,37
Familia Hernández	28,47	806	74	45,53	445,30	4,45
Marleny Olarte	32,85	794	86	53,65	524,71	5,25
Familia Galván	11,28	826	54	42,72	417,84	4,18
Gerardo Mantilla	10,40	826	54	43,60	426,40	4,26

Tabla 20. Presión para cada punto del sistema 2

Lugar	Pérdidas	Altura geométrica	Dif. De altura	Altura con pérdidas	Presión (kPa)	Presión bar
Familia Rodríguez	34,58	809	71	36,42	356,24	3,56
Fidel Valderrama	15,49	835	45	29,51	288,61	2,89
Teresa Mendoza	26,21	814	66	39,79	389,12	3,89
Roque Arenas	26,39	814	66	39,61	387,45	3,87
Jesús Vargas	53,10	794	86	32,90	321,79	3,22

7.5. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Se procede a especificar las respectivas estimaciones para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico con el cual se va a alimentar el sistema de bombeo del proyecto para cada uno de los dos escenarios planteados; además de detallar la selección del mes crítico para llevar a cabo dichos cálculos de este apartado, las especificaciones técnicas del panel, precisar la potencia pico que se debe alcanzar y presentar el diagrama unifilar de cada instalación.

7.5.1. Energía Hidráulica Vs Horas De Sol Pico

Para todo cálculo de requerimientos para un sistema solar autónomo, el dimensionado se realiza considerando el criterio del mes crítico debido a su promedio de radiación en horas de sol pico (HSP). En este caso, por ser una aplicación para riego, el mes crítico se determina por una relación entre HSP y la energía hidráulica que representa el bombeo del requerimiento de agua en un determinado mes. Para calcular la energía hidráulica que representa elevar el agua a una altura geométrica de 88 metros más los 4,2 metros de pérdidas para el caso de la alternativa del bombeo en DC y una altura de 88 metros más 16,77 metros de pérdidas para el caso del bombeo en AC; cabe resaltar que se omitió el valor de la presión atmosférica ya que se busca trabajar con presiones manométricas.

$$E_{Hidráulica} \left[\frac{kWh}{Día} \right] = \frac{\rho [kg/m^3] * g [m/s^2] * Q [m^3/día] * (h_{geométrica} + h_{pérdidas}) [m]}{3.6 \times 10^6}$$

Obteniendo el valor de la anterior ecuación y utilizando los datos de las horas sol pico de la tabla 4, se procede a estimar la relación entre la energía hidráulica y las HSP de la siguiente manera:

$$\frac{Eh}{HSP} = \frac{\text{Energía hidráulica para cada mes} \left[\frac{kWh}{Día} \right]}{\text{Horas de sol pico de cada mes} [HSP]}$$

De esta manera, el mayor coeficiente que se obtenga de la relación anterior será seleccionado como el mes crítico y con el cual se harán los posteriores cálculos para el dimensionado solar.

Tabla 21. Relación entre energía hidráulica y HSP para bombeo en DC

Mes	Q (m ³ /d)	H [metros]	Eh [kWh/día]	HSP [kWh/m ² *día]	Eh/HSP
Enero	112,093	92,2	28,162	4,962	5,675
Febrero	314,591	92,2	79,039	5,960	13,260
Marzo	0	92,2	-	5,417	-
Abril	0	92,2	-	4,632	-
Mayo	0	92,2	-	4,941	-
Junio	173,624	92,2	43,622	4,998	8,727
Julio	46,526	92,2	11,689	5,474	2,135
Agosto	92,193	92,2	23,163	5,749	4,028
Septiembre	33,125	92,2	8,322	5,175	1,608
Octubre	0	92,2	-	5,200	-
Noviembre	0	92,2	-	4,483	-
Diciembre	238,529	92,2	59,929	5,661	10,585

Tabla 22. Relación entre energía hidráulica y HPS para bombeo en AC

Mes	Q (m ³ /d)	H (metros)	Eh[kWh/día]	HSP [kWh/m ² *día]	Eh/HSP
Enero	112,093	104,77	32,002	4,962	6,448
Febrero	314,591	104,77	89,815	5,960	15,068
Marzo	0	104,77	-	5,417	-
Abril	0	104,77	-	4,632	-
Mayo	0	104,77	-	4,941	-
Junio	173,624	104,77	49,569	4,998	9,917
Julio	46,526	104,77	13,283	5,474	2,426
Agosto	92,193	104,77	26,321	5,749	4,577
Septiembre	33,125	104,77	9,457	5,175	1,827
Octubre	0	104,77	-	5,200	-
Noviembre	0	104,77	-	4,483	-
Diciembre	238,529	104,77	68,099	5,661	12,029

En algunos meses el caudal necesitado es nulo debido a que las precipitaciones en el mismo satisfacen las necesidades de riego del cultivo.

7.5.2. Potencia Pico Del Sistema

Con el fin de estimar la cantidad de paneles con sus respectivas características, se tiene en primer lugar que calcular la potencia pico del sistema. Por ende, se utilizó la ecuación 16 para obtener este valor de potencia eléctrica pico demandada por el sistema de bombeo y para obtener el valor de la energía eléctrica a suministrar dependiendo de la energía hidráulica, se tomaron en cuenta las eficiencias según ficha técnica, de la motobomba y del controlador de 43% y 95% respectivamente para la primera alternativa y eficiencias de bomba y de inversor-variador de 61% y 91% respectivamente para la segunda alternativa.

Adicionalmente para obtener el valor de la energía hidráulica que se muestran en las tablas 21 y 22, fue necesario despejar esta variable de la ecuación 16 con el fin de conocer dicha energía que se le estaría entregando al fluido si se trabaja en cada mes con la potencia pico generada por el sistema fotovoltaico del mes crítico con valores de temperatura media diaria del módulo obtenida de la ecuación 19 (45°C), factor de acople medio 0,9 (tomado para bombas centrífugas) y coeficiente de pérdidas por temperatura de $-0,5\%/^{\circ}\text{C}$. También, se muestra un valor del caudal para cada mes, este número viene del resultado de despejar la variable Q de la ecuación de la energía hidráulica mencionada en la sección anterior. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 23. Potencia pico que demanda el sistema de bombeo en DC

MES	Ee [kWh/día]	Potencia Pico [W]	Eh [kWh/día]	Q [m ³ /día]	Q [m ³ /hora] HSP
Enero	69,264	17.231,240	65,808	261,928	52,781
Febrero	194,391	40.264,274	79,040	314,592	52,781
Marzo	-	-	71,844	285,952	52,781
Abril	-	-	61,433	244,515	52,781
Mayo	-	-	65,530	260,822	52,781
Junio	107,286	26.499,082	66,282	263,815	52,781
Julio	28,750	6.483,789	72,593	288,932	52,781
Agosto	56,968	12.232,089	76,246	303,472	52,781
Septiembre	20,469	4.883,108	68,625	273,140	52,781
Octubre	-	-	68,965	274,493	52,781
Noviembre	-	-	59,457	236,651	52,781
Diciembre	147,391	32.141,929	75,074	298,807	52,781

De esta forma, para el sistema de bombeo en DC se tiene que la potencia pico que requiere el sistema es de 40,26 kW en el mes crítico, es decir, es el valor que se tiene que instalar con el arreglo de módulos fotovoltaicos para alcanzar esta potencia para cumplir con la función del bombeo de agua. Es importante mencionar que el caudal que se entregará al tanque por hora,

es el mismo en cada mes ya que los valores que influyen en este resultado son las horas de sol pico que y el caudal necesitado por mes.

Tabla 24. Potencia pico que demanda el sistema de bombeo AC

MES	Ee [kWh/día]	Potencia Pico [W]	Eh [kWh/día]	Q [m3/día]	Q [m ³ /hora]
Enero	54,103	14772,834	74,780	261,928	52,780
Febrero	151,843	34519,713	89,815	314,591	52,780
Marzo	0	0	81,638	285,952	52,780
Abril	0	0	69,808	244,515	52,780
Mayo	0	0	74,464	260,821	52,780
Junio	83,803	22718,420	75,318	263,815	52,780
Julio	22,457	5558,737	82,489	288,931	52,780
Agosto	44,498	10486,919	86,640	303,471	52,780
Septiembre	15,988	4186,428	77,980	273,139	52,780
Octubre	0	0	78,367	274,493	52,780
Noviembre	0	0	67,563	236,650	52,780
Diciembre	115,130	27556,19	85,308	298,806	52,780

Para este caso, según la información de la tabla 24 se tiene que la potencia pico requerida del sistema es de 34,51 kW en el mes crítico por lo cual, es la potencia que se debe instalar con el arreglo de módulos fotovoltaicos para hacer trabajar a valores nominales el dispositivo de bombeo. Igualmente, para las dos alternativas es el mismo caudal por cada hora en cada uno de los 12 meses, debido a que las HSP para los dos casos son los mismos valores.

7.5.3. Conformación Del Campo Solar

De acuerdo a la potencia pico que se requiere instalar para suplir la demanda energética del proyecto, se efectúa la configuración del arreglo de módulos fotovoltaicos, usando el panel solar fotovoltaico policristalino de referencia AmeriSolar AS-6P-340W que presenta las siguientes especificaciones técnicas, necesarias para establecer el arreglo:

Tabla 25. Especificaciones técnicas del panel AS-6P-340W

AMERISOLAR-6P-340W		
Pmax	340	W
Vmax	37,5	V
Imax	9,07	A
Voc	46,1	V
Isc	9,5	A
Eficiencia	17,52%	
Coefi. Temp	0,50%	% W/C°
Temp prom	45	°C
Largo	1,956	m
Ancho	0,992	m

En la tabla 25 están especificadas la potencia nominal del panel, el voltaje de máxima potencia (Vmp), la corriente de corto circuito (Isc), el voltaje de circuito abierto (Voc) y la eficiencia; las especificaciones eléctricas y mecánicas del panel se encuentran en el Anexo 11.

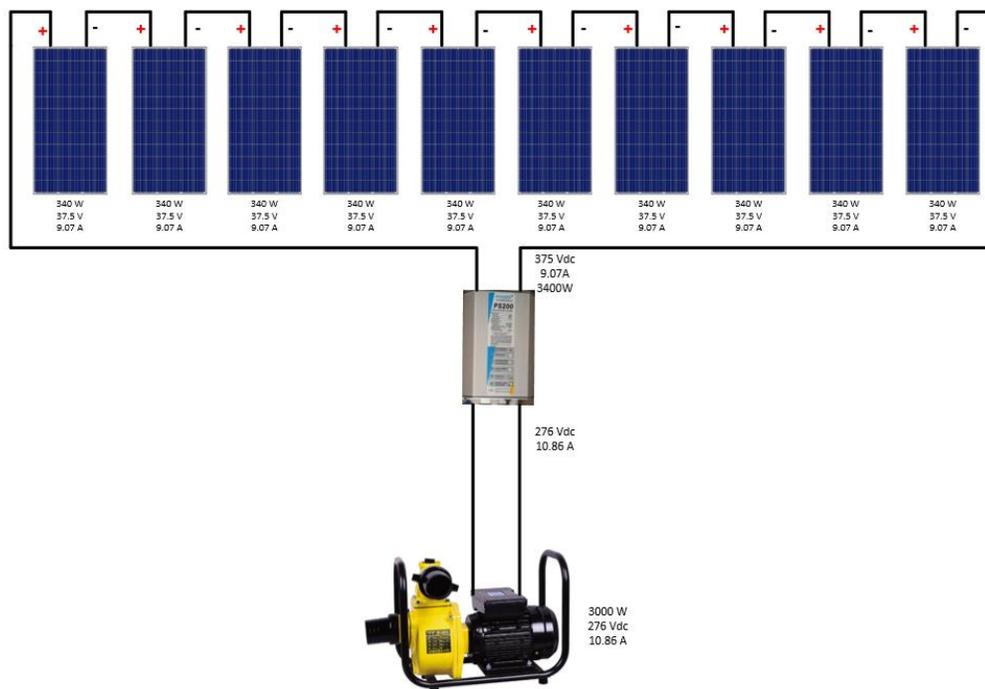


Ilustración 35. Arreglo de paneles AS-6P-340W para alternativa en DC

De esta manera, para el sistema de bombeo correspondiente a la primera alternativa para alimentar cada una de las 12 bombas seleccionada en secciones anteriores. Se requiere alcanzar el valor de potencia pico de 40,2 kW que son divididos entre los 0,340 kW de potencia nominal del panel dando como resultado 120 módulos solares. Así mismo, se realizó la

relación entre el voltaje del sistema y el voltaje del panel dando como resultado un arreglo de 10 paneles en serie para alcanzar los valores de voltaje y corriente de operación de la bomba siendo de 276 volts y 10,86 ampers respectivamente. Es importante mencionar que no fue necesario realizar una selección de controlador (regulador) ya que el paquete que se vende de la bomba, incluye este dispositivo apto para las condiciones de trabajo de la bomba en particular.

Para la segunda alternativa que corresponde al sistema de bombeo en AC, se necesita un total de 102 módulos solares que de igual manera se obtuvieron dividiendo los 34,51 kW de potencia pico del sistema entre los 0,340 kW del panel. Por consiguiente, el arreglo adecuado para el sistema de alimentación para el bombeo es 17 paneles en serie para superar la tensión mínima de operación de 565 Volts de la bomba (lo establecido por el fabricante del inversor) y no exceder el voltaje máximo del inversor (900V). Se tiene 6 paneles con el fin de no exceder los valores de tensión y alcanzar la potencia pico del sistema. Adicionalmente las especificaciones técnicas del inversor-variador de referencia SD700SP-HW de la compañía Power Electronics se encuentran en el Anexo 12.

7.5.4. Instalación Eléctrica

Para el sistema eléctrico del proyecto fue necesario estimar las protecciones o mejor conocidos fusibles para sobre corrientes y también el calibre del conductor de las conexiones tomando como guía y siguiendo las especificaciones estipuladas de la norma NTC 2050 (Código Eléctrico Colombiano).

A. Protecciones Y Cableado Para Bombeo En Dc

En este orden, la estimación del calibre del conductor se realizó aplicando los siguientes pasos:

- Obtención del valor de la corriente del circuito, que en este caso corresponde a la corriente de cortocircuito de un panel ya que todo el arreglo está hecho en serie y multiplicarla por 125%:

$$i_{cc} = i_{sc} * 125\% = 9,5A * 1,25 = 11,87A$$

- Corrección de la corriente del circuito calculada en el primer paso, con el coeficiente por diferencia de temperatura ambiente del sitio (aproximadamente 30°C) estipulado en la tabla 690-31 de la NTC 2050.

$$i_{corregida T} = i_{cc} * 1 = 11,87A * 1 = 11,87A$$

Se selecciona de la compañía CENTELSA el cable conductor fotovoltaico PV XLPE 2000V SR de calibre 14 AWG.

No obstante, se implementó una protección contra sobrecorrientes de 15A antes del controlador con el objetivo de proteger los paneles y otra protección termomagnética de 20A debido a que la corriente que le pide la bomba al controlador es de 10,86A y al aplicarle el factor de 125% para seleccionar el calibre del conductor, resulta 13,58A.

Adicionalmente, en la norma NTC 2050 en el Artículo 690-13, especifica que se debe instalar algún medio que desconecte todos los conductores portadores de corriente en una fuente de energía fotovoltaica de los demás conductores, de esta manera se implementaron seccionadores (interruptores) de 1000V para 16A a la salida del arreglo de los paneles. Por último se instaló la puesta a tierra del sistema en el negativo que llega al controlador, según se menciona en el Artículo 690-41.

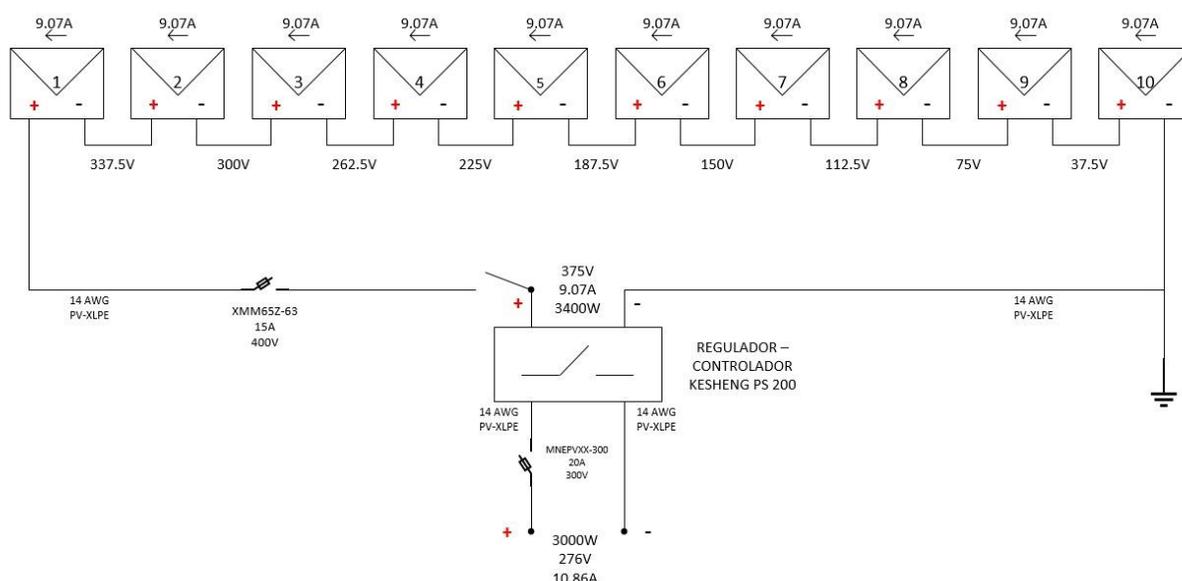


Ilustración 36. Diagrama unifilar del sistema de bombeo en DC

B. Protecciones Y Cableado Para Bombeo En Ac

Para esta alternativa es necesario dividir las estimaciones de protecciones y cableado, puesto que antes del inversor se maneja todo en corriente continua y luego de este se trabaja en corriente alterna a tres fases. Por lo tanto se tiene lo siguiente:

- Obtener el valor de la corriente de corto circuito para los arreglos en serie, lo cual es la misma corriente de un solo panel puesto que cada fila de 17 módulos en serie da como resultado una corriente de 9,26A y de igual forma se tiene que aplicar el factor de 125% estipulado en la NTC 2050.

$$i_{cc} = i_{sc} * 1,25 = 9,5A * 1,25 = 11,87A$$

- Corregir la corriente del corto circuito calculada con un coeficiente por diferencia de temperatura ambiente del sitio (aproximadamente 30 °C) que se encuentra en la tabla 690-31 de la NTC 2050.

$$i_{\text{corregida}} = i_{cc} * 1 = 11,87A * 1 = 11,87A$$

- Se selecciona de la empresa CENTELSA SOLAR el cable PV XLPE 2000V SR de calibre 14AWG.
- Ahora se realizó el mismo procedimiento pero para los arreglos en paralelo del sistema fotovoltaico de esta alternativa, empezando con la corriente de corto circuito:

$$i_{cc} = \text{No. Pararelos} * i_{cc} * 1,25 = 6\text{Paralelos} * 9,5A * 1,25 = 71,25A$$

- Aplicar el factor de corrección de corriente por diferencia en la temperatura ambiente de trabajo estipulado en la tabla 690-31 de la NTC 2050:

$$i_{\text{corregida}} = i_{cc} * 1 = 71,25 * 1 = 71,25A$$

- De acuerdo al último valor estimado de corriente se procedió a seleccionar el cable conductor de CENTELSA FOTOVOLTAICO PV XLPE 2000V SR 8AWG.

Ahora bien, se calcula el cableado que corresponde al tramo del inversor a la bomba:

- Para conocer el valor de la corriente para dimensionar el calibre del conductor para alimentar la bomba trifásica, se toma el dato de corriente a la salida del inversor variador que corresponde a 60A. Por lo tanto se tiene:

$$i = 60A * 1,25 = 75A$$

- Finalmente se procede a corregir la corriente del paso anterior por el mismo coeficiente de diferencia de temperatura ambiente y obtener el conductor Superflex XLPE-FR Aislado de PROCABLES de calibre 6AWG.

$$i_{\text{corregidaT}} = i * 1 = 75A * 1 = 75A$$

Siguiendo con las mismas indicaciones mencionadas en la primera alternativa, se tiene que por norma se debe instalar un medio de desconexión manual que abra el circuito de todos los conductores portadores de corriente en una fuente de energía fotovoltaica de los demás conductores, por lo tanto se implementó un seccionador de 80A a 1000V; además se

seleccionaron diodos al final de cada arreglo en serie y su respectiva protección contra sobrecorrientes.

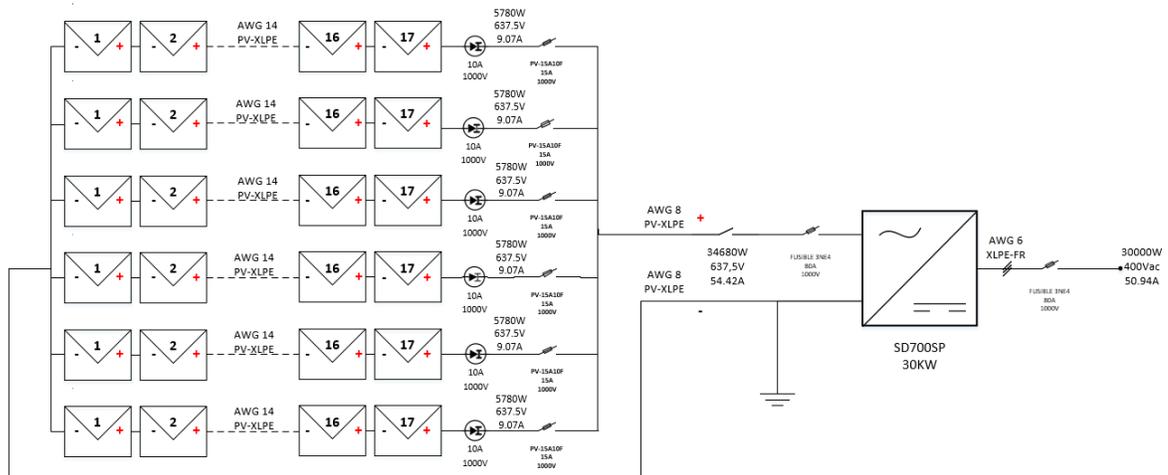


Ilustración 37. Diagrama unifilar del sistema de bombeo en AC

7.5.5. Ángulo Óptimo Y Separación Entre Paneles

En esta sección se encuentra estipulada la distancia mínima entre dos filas consecutivas de paneles para evitar la sombra entre ellos, por causa de la longitud del módulo y la inclinación con respecto al eje horizontal del montaje. Adicionalmente se menciona la metodología que se realizó para obtener el ángulo óptimo al cual se tenía que posicionar el panel con el fin de obtener la máxima eficiencia posible (menores pérdidas por inclinación).

En primer lugar se tenía que conocer el ángulo óptimo para poder estimar la distancia entre las filas de paneles, por ende, se utilizó el software PVSYST entrando a tipo de sistema conectado a red (Grid-Connected) en la herramienta de diseño de proyecto (Project Design); seguidamente se procedió a ingresar las coordenadas del sitio con tipo de campo como plano fijo para que finalmente el software arrojara como resultado el ángulo óptimo que se necesitaba. Esta simulación se encuentra estipulada en el Anexo 13.

Otra manera de obtener este valor, se basaba en utilizar la ecuación 18 por ser una zona cerca al Ecuador, donde se tiene en cuenta la latitud del sitio en el que se va a trabajar obteniendo el siguiente resultado:

$$\beta_{opt} = 20^\circ - Lat = 20^\circ - 7^\circ = 13^\circ$$

Usando la anterior definición da como resultado que se debería tener de inclinación en los paneles un ángulo de 13° con respecto al plano horizontal de montaje, pero no es recomendable tener el módulo a esta inclinación, puesto que se vería reflejado en aumento de pérdidas por suciedad; por consiguiente, se determinó por literatura y se corroboró a través del software PVSYST que el ángulo al cual estarían inclinado los paneles es de 15° .

Ahora bien, teniendo ya el valor del ángulo óptimo, lo que resta es conocer la distancia entre las filas consecutivas de módulos solares. Para este cálculo se utilizó la ecuación 17 teniendo en cuenta las siguientes variables:

- Longitud del módulo fotovoltaico (L_m) = 1,956 metros
- Ángulo de inclinación del panel (β) = 15°

$$D = (1,956 * \text{Cos} (15^\circ) + \left(\frac{1,956 * \text{Sen} (15^\circ)}{\text{Tan} (90^\circ - 15^\circ)} \right)) = 2,025 \text{ metros}$$

7.6. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

Para llevar a cabo este proyecto se debe definir los costos que conlleva su implementación. De esta manera, para la elaboración del presupuesto, se determina la cantidad y el precio de los dispositivos requeridos; se consideraron los valores monetarios indicados por cada uno de los proveedores. Así mismo, para la estimación del precio indicado de la construcción del tanque, se realizó la cotización de este a través de la empresa ISMAQ (Anexo 14) ubicada en la ciudad de Bucaramanga.

En las tablas 26 y 27 se evidencian los costos totales de inversión para ambos escenarios, de este modo corresponden 563,68 millones COP para la alternativa en DC y 526,52 millones de COP para el sistema en AC, siendo este último el menos costoso. Cabe resaltar que el costo del tanque de almacenamiento es más del 40% de la inversión inicial para ambos casos.

Tabla 26. Presupuesto para la alternativa de bombeo en DC

INVENTARIO	NO.	PRECIO POR UNIDAD	TOTAL
COSTOS DE INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA			
Instalación fotovoltaica	1	\$ 5.400.000,00	\$ 5.400.000,00
Instalación hidráulica	1	\$ 25.000.000,00	\$ 25.000.000,00
Obra Civil (Beneficiarios)	1	\$ -	\$ -
		SUBTOTAL	\$ 30.400.000,00
COSTOS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO			
Panel solar fotovoltaico AS-6P-340W	120	\$ 440.640,00	\$ 52.876.800,00
Estructura de panel solar x6 paneles	20	\$ 270.228,00	\$ 5.404.560,00
Interruptor DC 1000V 16A IP66	12	\$ 234.430,00	\$ 2.813.160,00
Breaker DC 2 Polos 400V 16A Shyy	12	\$ 234.126,97	\$ 2.809.523,64
Breaker DC MidNite Solar 300VDC	12	\$ 145.690,00	\$ 1.748.280,00
Cable 14 AWG PV-XLPE CENTELSA 100 m	120	\$ 2.600,00	\$ 312.000,00
		SUBTOTAL	\$ 65.964.323,64
COSTOS DEL SISTEMA HIDRÁULICO			
Conjunto Bomba DS - Controlador	12	\$ 2.652.650,00	\$ 31.831.800,00
Tubo PVC PAVCO RDE 26 4" X 6m	274	\$ 355.609,00	\$ 97.436.866,00
Tubo PVC PAVCO RDE 21 3" X 6m	280	\$ 208.487,00	\$ 58.376.360,00
Tubo PVC PAVCO RDE 21 1" X 6m	53	\$ 26.716,00	\$ 1.415.948,00
Tubo PVC PAVCO RDE 21 2" X 6m	58	\$ 96.351,00	\$ 5.588.358,00
Tubo PVC PAVCO RDE 26 2,1/2" X 6m	20	\$ 156.153,00	\$ 3.123.060,00
Tubo PVC PAVCO RDE 21 1,1/4" X 6m	287	\$ 48.121,00	\$ 13.810.727,00
Tee 3"	20	\$ 115.060,00	\$ 2.301.200,00
Tapón de cebado	12	\$ 15.990,00	\$ 191.880,00
Válvula de compuerta 4"	4	\$ 1.324.012,78	\$ 5.296.051,12
Válvula check 4"	2	\$ 189.900,00	\$ 379.800,00
Válvula de pie con filtro 4"	2	\$ 98.200,00	\$ 196.400,00
Válvula de bola para tubería de 1,1/4"	5	\$ 18.689,00	\$ 93.445,00
Válvula de bola para tubería de 1"	2	\$ 14.912,00	\$ 29.824,00
Válvula de bola para tubería de 2"	2	\$ 40.806,00	\$ 81.612,00
Válvula de bola para tubería de 2,1/2"	1	\$ 122.890,00	\$ 122.890,00
Manómetro para tubería PVC	10	\$ 18.900,00	\$ 189.000,00
Reducción de 4" a 2,1/2"	8	\$ 29.506,00	\$ 236.048,00
Codo 90° 4"	10	\$ 88.429,00	\$ 884.290,00
Codo 45° 4"	5	\$ 82.077,00	\$ 410.385,00
Tanque 315,5 m ³	1	\$ 245.321.000,00	\$ 245.321.000,00
		SUBTOTAL	\$ 467.316.944,12
		TOTAL	\$ 563.681.267,76

Tabla 27. Presupuesto para la alternativa de bombeo en AC

INVENTARIO	NO.	PRECIO POR UNIDAD	TOTAL
COSTOS DE INSTALACION Y PUESTA EN MARCHA			
Instalación fotovoltaica	1	\$ 5.400.000,00	\$ 5.400.000,00
Instalación hidráulica	1	\$ 25.000.000,00	\$ 25.000.000,00
Obra civil (Beneficiarios)	1	\$ -	\$ -
		SUBTOTAL	\$ 30.400.000,00
COSTOS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO			
Panel solar fotovoltaico AS-6P-340W	102	\$ 440.640,00	\$ 44.945.280,00
Estructura de panel solar x6 paneles	17	\$ 270.228,00	\$ 4.593.876,00
Inversor- Variador SD700SP PE 30kW	1	\$ 30.042.999,00	\$ 30.042.999,00
Interruptor DC CENOE 1000V 80A	1	\$ 176.660,00	\$ 176.660,00
Diodo de bloqueo solar 10A 1000V	6	\$ 3.500,00	\$ 21.000,00
Fusible solar PV-15A10F 15A 1000V	6	\$ 41.500,00	\$ 249.000,00
FUSIBLE 3NE4 120 80A 1000V	2	\$ 133.000,00	\$ 266.000,00
Cable eléctrico AWG 6 XLPE-FR 50 metros	50	\$ 46.524,00	\$ 2.326.200,00
Cable AWG 14 PV-XLPE CENTALSA 30m	90	\$ 2.600,00	\$ 234.000,00
Cable AWG 8 PV-XLPE CENTELSA 50m	50	\$ 29.985,00	\$ 1.499.250,00
		SUBTOTAL	\$ 84.354.265,00
COSTOS DEL SISTEMA HIDRÁULICO			
Bomba Kawamoto 30kw-40,3hp	1	\$ 25.000.000,00	\$ 25.000.000,00
Tubo PVC PAVCO RDE 26 4" X 6m	137	\$ 355.609,00	\$ 48.718.433,00
Tubo PVC PAVCO RDE 21 3" X 6m	280	\$ 208.487,00	\$ 58.376.360,00
Tubo PVC PAVCO RDE 21 1" X 6m	53	\$ 26.716,00	\$ 1.415.948,00
Tubo PVC PAVCO RDE 21 2" X 6m	58	\$ 96.351,00	\$ 5.588.358,00
Tubo PVC PAVCO RDE 26 2,1/2" X 6m	20	\$ 156.153,00	\$ 3.123.060,00
Tubo PVC PAVCO RDE 21 1,1/4" X 6m	287	\$ 48.121,00	\$ 13.810.727,00
Tee 3"	20	\$ 115.060,00	\$ 2.301.200,00
Tapón de cebado	12	\$ 15.990,00	\$ 191.880,00
Válvula de compuerta 4"	4	\$ 1.324.012,78	\$ 5.296.051,12
Válvula de pie con filtro 4"	2	\$ 98.200,00	\$ 196.400,00
Válvula de bola para tubería de 1,1/4"	5	\$ 18.689,00	\$ 93.445,00
Válvula de bola para tubería de 1"	2	\$ 14.912,00	\$ 29.824,00
Válvula de bola para tubería de 2"	2	\$ 40.806,00	\$ 81.612,00
Válvula de bola para tubería de 2,1/2"	1	\$ 122.890,00	\$ 122.890,00
Manómetro para tubería PVC	10	\$ 18.900,00	\$ 189.000,00
Reducción de 4" a 2,1/2"	8	\$ 29.506,00	\$ 236.048,00
Codo 90° 4"	10	\$ 88.429,00	\$ 884.290,00
Codo 45° 4"	5	\$ 82.077,00	\$ 410.385,00
Tanque 315,5 m ³	1	\$ 245.321.000,00	\$ 245.321.000,00
		SUBTOTAL	\$ 411.766.711,12
		TOTAL	\$ 526.520.976,12

Se realizó una proyección de costos de funcionamiento tanto para el escenario en AC como en DC. Se elaboró a 10 años puesto que en este lapso de tiempo es donde los equipos de bombeo empiezan a presentar fallas [19] y es necesario realizar una nueva inversión. Asimismo, los costos de operación y mantenimiento del sistema fotovoltaico fueron tomados de la base de datos del NREL [20], y del sistema de bombeo de un trabajo de grado denominado “Evaluación técnico-económica de una instalación de bombeo solar fotovoltaico aplicada a la ampliación de la frontera agrícola en zonas aisladas de Arequipa” [21], donde posteriormente este valor fue verificado con un experto en mantenimiento de este tipo de tecnologías. El costo de mantenimiento del sistema de bombeo aumentó cada año con respecto al incremento de salario mínimo para el año 2020 de 6% y del sistema fotovoltaico se mantiene constante puesto que este depende de la potencia pico instalada. Estas proyecciones se presentan en la tabla 28 y 29.

Tabla 28. Proyección de costos del sistema en DC

PROYECCIÓN DE COSTOS DEL SISTEMA EN DC					
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 5	Año 10
Costos de operación y mantenimiento del sistema fotovoltaico		\$ 2.912.408	\$ 2.912.408	\$ 2.912.408	\$ 2.912.408
Costos de operación y mantenimiento del sistema de bombeo		\$ 8.138.250	\$ 8.626.545	\$10.274.353	\$13.749.402
Inversión inicial	\$563.681.267	0	0	0	0
Total	\$563.681.267	\$11.050.658	\$11.538.953	\$13.186.762	\$16.661.811

Tabla 29. Proyección de costos del sistema en AC

PROYECCIÓN DE COSTOS DEL SISTEMA EN AC					
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 5	Año 10
Costos de operación y mantenimiento del sistema fotovoltaico		\$2.496.453	\$2.496.453	\$2.496.453	\$2.496.453
Costos de operación y mantenimiento del sistema de bombeo		\$6.781.875	\$7.188.788	\$8.561.961	\$11.457.835
Inversión inicial	\$526.520.976	0	0	0	0
Total	\$526.520.976	\$9.278.328	\$9.685.241	\$11.058.414	\$13.954.289

8. CONCLUSIONES

- Se encontró que el sistema de riego actual no cubría la totalidad de la población, solo el 64% de los habitantes cuentan con este beneficio. Adicionalmente, debido a la antigüedad y buen estado del distrito de riego actual, es recomendable no intervenir con alguna mejora al sistema y optar por la construcción de un mecanismo similar para el abastecimiento de agua para los cultivos.
- A partir de las necesidades de presión de cada usuario, se pueden disminuir los costos del proyecto con la implementación de pequeños diámetros de tuberías en el sistema de distribución de agua debido a que se cuenta con una gran caída del fluido, por lo tanto se pueden manejar pérdidas por fricción considerables sin afectar el valor de presión que se le debe suministrar a cada beneficiario.
- La diferencia entre los presupuestos de las dos alternativas equivale a un 7% siendo el sistema con bombeo en AC el más económico. Además se determinó más viable la opción de utilizar una bomba en corriente alterna, correspondiente a la facilidad de mantenimiento de este sistema en comparación a la alternativa de bombeo en DC debido al elevado número de bombas, accesorios de tuberías y equipo eléctrico.
- Con la implementación de este distrito de riego a partir de bombeo solar, se beneficiarían 10 familias que podrán mejorar la calidad y cantidad de producción de su producto estrella, en este caso el limón y por ende tener una alza en sus exportaciones.
- En la etapa de dimensionar el sistema fotovoltaico, es imperativo la correcta determinación del coeficiente para la selección del mes crítico, ya que este nos brinda un adecuado equilibrio entre las bajas horas de sol pico, y las altas necesidades de riego.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. J. S. Román, «Calculo de evapotranspiración potencial mediante formulas de Hargreaves,» Departamento Geología Universidad Salamanca, Salamanca, España , 2012.
- [2] S. &. Hargreaves, «Reference crop and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data,» de *Applied Engineering in Agriculturist*, 2000, pp. 265-267.
- [3] FAO , «Guidelines for computing crop water requirements,» Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 1998.
- [4] J. C. Alocén, Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego, Honduras, 2007.
- [5] Y. A. Cengel, Mecánica de fluidos: Fundamentos y Aplicaciones, Ebooks Académicos, 2004 .
- [6] J. Kijjarvi, «Darcy Friction Factor Formulae in Turbulent Pipe Flow,» Julio 29 de 2011.
- [7] J. C. Leòn, «Herramientas de Ingenieros,» 21 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://herramientasdeingenieros.com/que-es-la-npsh-y-como-se-calcula/>.
- [8] C. A. Castillo, «Mecànica de fluidos,» 2 Noviembre 2016. [En línea]. Available: <http://mecanicadefluidos-lab.blogspot.com/2016/11/perdidas-por-friccion-en-accesorios.html>.
- [9] C. A. J. Carballo, *Mecánica de Fluidos - Hidrostática*, Costa Rica , 2018.
- [10] E. Lorenzo, Radiación solar y dispositivos fotovoltaicos, España: Universidad Politécnica de Madrid, 2006.
- [11] TecnoSol, «Distancias entre filas de paneles solares para evitar el sobreado,» 5 Diciembre 2016. [En línea]. Available: <https://tecnosolab.com/noticias/distancia-entre-filas-de-paneles-solares/>.
- [12] L. J. A. M. &. V. P. Manquillo, «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),» Santiago de Cali, 2012.

- [13] G. H. Hargreaves, «DEFINING AND USING REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION,» 1994.
- [14] Z. Samani, «ESTIMATING SOLAR RADIATION AND EVOTRANSPIRATION USING MINIMUM CLIMATOLOGICAL DATA,» 2000.
- [15] M. P. & I. Torres, «Diseño de un sistema de generación para distrito de riego en Santa Lucia,» Atlantico, Colombia, 2019.
- [16] J. C. Alocén, Manual práctico para el diseño de sistemas de miniriego, Honduras, 2007.
- [17] A. d. G. Santander, «WaybackMachine,» 17 Febrero 2015. [En línea]. Available: https://web.archive.org/web/20150924022256/http://www.giron-santander.gov.co/informacion_general.shtml.
- [18] IDEAM, «Aplicaciones meteorologicas - Clima IDEAM.,» IDEAM, 2019. [En línea]. Available: http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/comportamiento-mensual-precipitacion?p_p_id=110_INSTANCE_Bxb2LKaoA2TC&p_p_lifecycle=0&p_p_state=Normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_110_INSTANCE_Bxb2LKaoA2TC_redirect=http%3A%2F%2Fwww.ideam..
- [19] S. Chandel, «Review of solar photovoltaic water pumping system technology,» *ELSEVIER*, n° 10, p. 16, 2015.
- [20] NREL , «Resumen de costos y rendimiento de ATB 2019,» 2019. [En línea]. Available: <https://atb.nrel.gov/electricity/2019/summary.html>.
- [21] A. A. P. Vera, Evaluación técnico-económica de una instalación de bombeo solar fotovoltaico aplicada a la ampliación de la frontera agrícola en zonas aisladas de Arequipa, Arequipa: Universidad tecnológica del Perú, 2018.

ANEXOS

10. ANEXOS

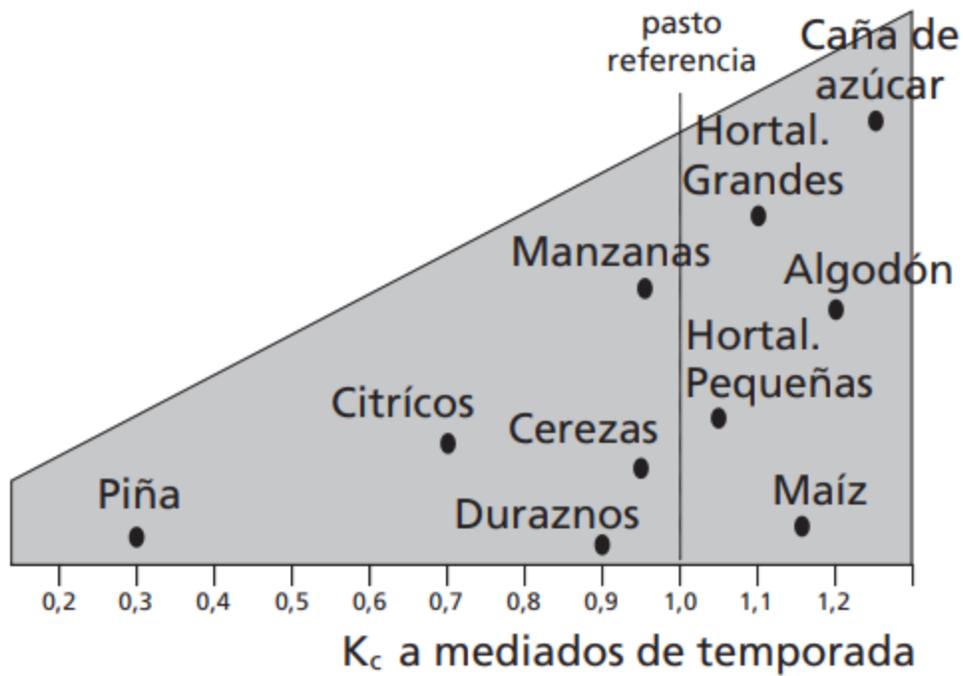
ANEXO 1: RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE EXTRATERRESTRE EN MILÍMETROS POR DÍA. TOMADO DE: (http://hidrologia.usal.es/practicass/ET/ET_Hargreaves.pdf)

Tabla de Radiación solar extraterrestre en mm/día (Allen et al., 1998) (Original en MJ·m⁻²·día⁻¹ ; 1 mm/día = 2,45 MJ·m⁻²·día⁻¹)

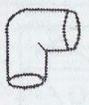
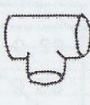
Latitud	HEMISFERIO NORTE												HEMISFERIO SUR											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	0.0	1.1	4.2	9.4	14.4	17.3	16.1	11.4	6.1	2.0	0.0	0.0	16.9	11.7	6.4	2.0	0.1	0.0	0.0	0.9	4.4	9.6	15.2	18.5
68	0.0	1.5	4.8	9.8	14.4	17.1	15.9	11.7	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 2: VALORES TÍPICOS DE K_c PARA DIFERENTES CULTIVOS COMPLETAMENTE DESARROLLADOS

Valores típicos de K_c para diferentes cultivos completamente desarrollados



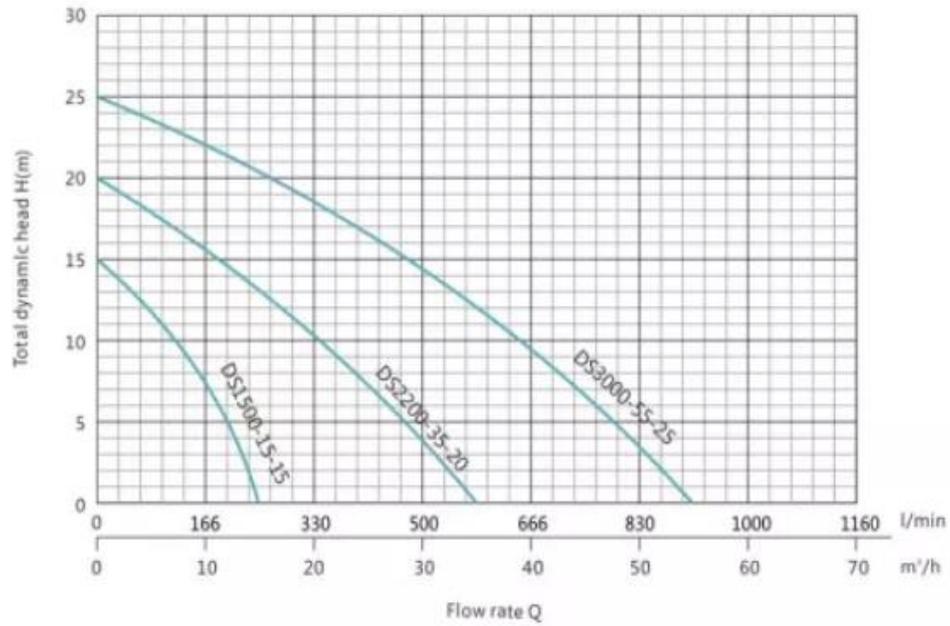
ANEXO 3: LONGITUDES EQUIVALENTES DE SINGULARIDADES EN TUBOS.
 TOMADO DE: <https://www.pirobloc.com/blog-es/calculo-perdidas-carga/>

									
DIAMETRO INTERNO (m.m.)	CURVA 90° R-3D	CURVA 90° R-2D	CODO	TE	MANGUERA R-100	DIAFRAGMA ABIERTA	MANQUITO	MACHO PASO RECTO	TECH TAYLOR
LONGITUD EQUIVALENTE EN m DE TUBO RECTO DE IGUAL RESISTENCIA AL FLUJO.									
25	0.52	0.70	0.82	1.77	0.30	2.56	—	0.37	—
32	0.73	0.91	1.13	2.38	0.40	3.29	—	0.49	—
40	0.85	1.10	1.31	2.74	0.49	3.44	1.19	0.58	—
50	1.07	1.40	1.68	3.35	0.55	3.66	1.43	0.73	—
65	1.28	1.65	1.98	4.27	0.70	4.60	1.52	0.85	—
80	1.55	2.07	2.47	5.18	0.85	4.88	1.92	1.04	0.20
90	1.85	2.44	2.90	5.79	1.01	—	—	1.22	—
100	2.13	2.77	3.35	6.71	1.18	7.62	2.19	1.40	0.23
115	2.41	3.05	3.66	7.32	1.28	—	—	1.58	—
125	2.71	3.66	4.27	8.23	1.43	13.11	3.05	1.77	0.30
150	3.35	4.27	4.88	10.06	1.55	16.29	3.11	2.13	0.37
200	4.27	5.49	6.40	13.11	2.41	19.81	7.92	2.74	0.82
250	5.18	6.71	7.92	17.07	2.99	21.34	10.67	3.47	0.61
300	6.10	7.92	9.75	20.12	3.35	28.96	15.85	4.08	0.76
350	7.01	9.45	10.97	23.16	4.27	28.96	—	4.88	0.91
400	8.23	10.67	12.80	26.52	4.88	—	—	5.49	1.04
450	9.14	12.19	14.02	30.48	5.49	—	—	6.22	1.16
500	10.36	13.11	15.85	33.53	6.10	—	—	7.32	1.25

NOTA: PARA CURVA 135° USAR VALOR CURVA 90°x 1.5

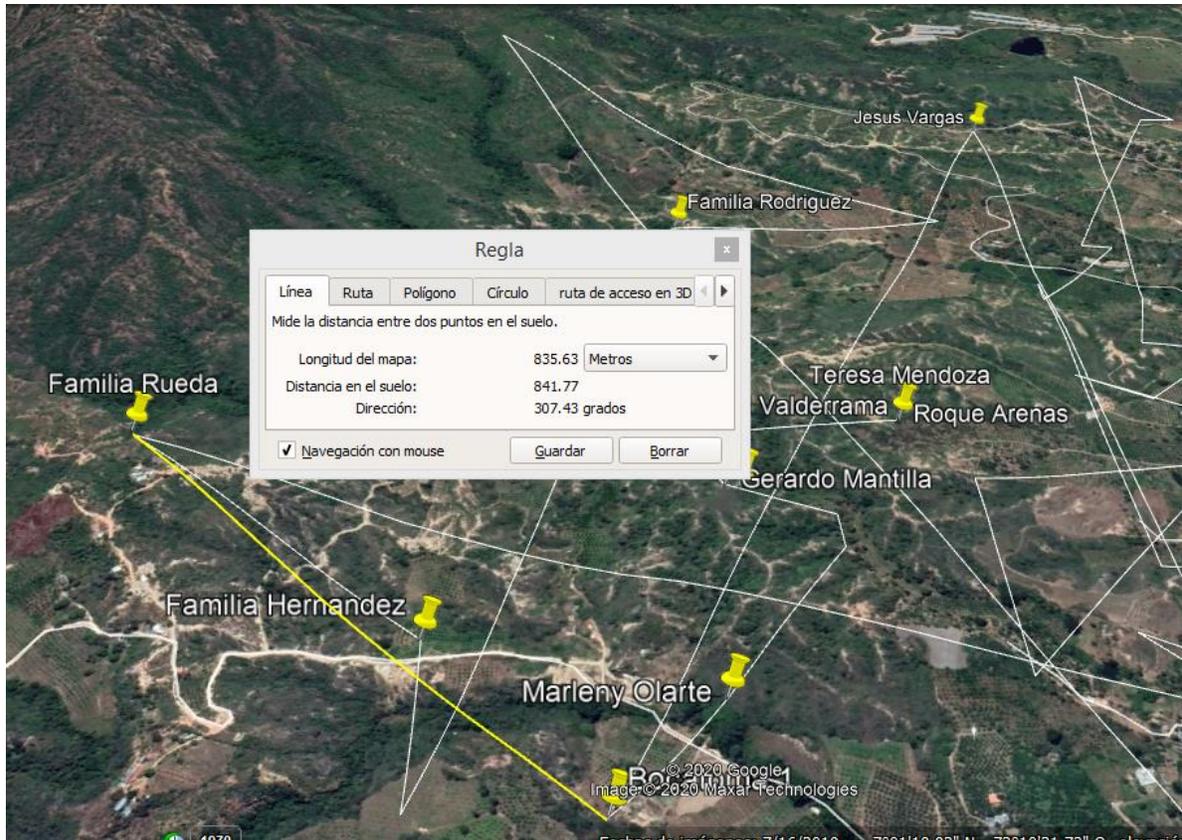
FIG. 17. LONGITUDES EQUIVALENTES DE SINGULARIDADES EN TUBOS

ANEXO 4: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA BOMBA DS3000-60-17



Model	Voltage	Power	Max. flow	Max. head	Max suction	Outlet Diameter	Weight
	DC(V)	P(W)	Q=m³/h	M	M	DN	kg
DS1500-20-17	156	1500	15	15	7	2"	15
DS2200-40-17	216	2200	35	20	7	3"	18
DS3000-60-17	276	3000	55	25	7	4"	22

ANEXO 5: DISTANCIA ENTRE BOCATOMA Y FAMILIA RUEDA TOMADA DESDE GOOGLE EARTH.



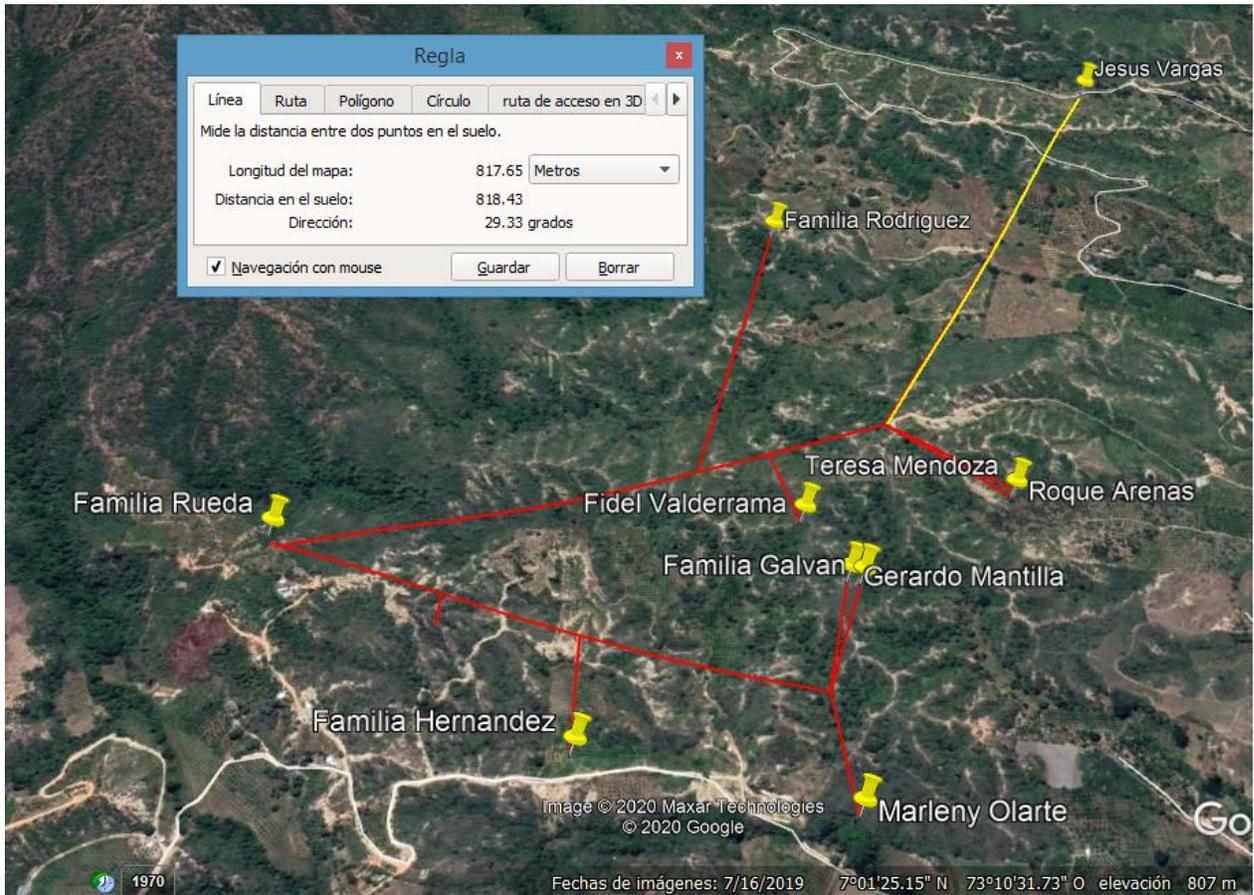
ANEXO 6: ALTURA QUE SE PUEDE ALCANZAR CON 6 BOMBAS

BOMBAS EN SERIE						
Caudal(m ³ /h)	Altura (metros)					
	1bomba	2bombas	3bombas	4bombas	5 bombas	6bombas
0	24,6520	49,304	73,956	98,608	123,260	147,912
2	24,1950	48,391	72,587	96,782	120,978	145,174
4	23,7060	47,413	71,119	94,826	118,532	142,238
6	23,1840	46,369	69,553	92,738	115,922	139,106
8	22,6290	45,259	67,889	90,518	113,148	135,778
10	22,0420	44,084	66,126	88,168	110,210	132,252
12	21,4216	42,843	64,265	85,686	107,108	128,530
14	20,7684	41,537	62,305	83,074	103,842	124,610
16	20,0824	40,165	60,247	80,330	100,412	120,494
18	19,3636	38,727	58,091	77,454	96,818	116,182
20	18,6120	37,224	55,836	74,448	93,060	111,672
22	17,8276	35,655	53,483	71,310	89,138	106,966
24	17,0104	34,021	51,031	68,042	85,052	102,062
26	16,1604	32,321	48,481	64,642	80,802	96,962
26,392	15,9901	31,980	47,970	63,960	79,950	95,940
28	15,2776	30,555	45,833	61,110	76,388	91,666
30	14,3620	28,724	43,086	57,448	71,810	86,172
32	13,4136	26,827	40,241	53,654	67,068	80,482
34	12,4324	24,865	37,297	49,730	62,162	74,594
36	11,4184	22,837	34,255	45,674	57,092	68,510
38	10,3716	20,743	31,115	41,486	51,858	62,230
40	9,2920	18,584	27,876	37,168	46,460	55,752
42	8,1796	16,359	24,539	32,718	40,898	49,078
44	7,0344	14,069	21,103	28,138	35,172	42,206
46	5,8564	11,713	17,569	23,426	29,282	35,138
48	4,6456	9,291	13,937	18,582	23,228	27,874
50	3,4020	6,804	10,206	13,608	17,010	20,412
52	2,1256	4,251	6,377	8,502	10,628	12,754
54	0,8164	1,633	2,449	3,266	4,082	4,898

ANEXO 7: NSPH DISP VS NPSH REQ DE LA BOMBA DS 3000-60-17

Q(m3/seg)	NPSH DISP	NPSH REQ
0	8,0058	2
0,01	7,9898	2,0007
0,02	7,9417	2,0030
0,03	7,8615	2,0067
0,04	7,7493	2,0119
0,05	7,6051	2,0186
0,06	7,4287	2,0267
0,07	7,2203	2,0364
0,08	6,9799	2,0475
0,09	6,7074	2,0601
0,1	6,4028	2,0742
0,11	6,0662	2,0898
0,12	5,6975	2,1069
0,13	5,2968	2,1254
0,14	4,8639	2,1454
0,15	4,3991	2,1670
0,16	3,9021	2,1900
0,17	3,3732	2,2145
0,18923	2,2657	2,2657
0,19	2,2190	2,2679
0,2	1,5938	2,2968
0,21	0,9366	2,3273
0,22	0,2473	2,3592

ANEXO 8: MEDIDAS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN



ANEXO 9: CÁLCULO DE PÉRDIDAS PARA LOS RAMALES Y TRAMOS DE1 SISTEMA A

TRAMO 1 - SISTEMA A			TRAMO 2 - SISTEMA A		
Diámetro 3"	0,08042	m	Diámetro 1 1/4"	0,03814	m
Longitud	10	m	Longitud	10	m
Caudal	0,007282	m ³ /sg	Caudal	0,001456	m ³ /sg
Rugosidad relativa	1,86E-05		Rugosidad relativa	3,93E-05	
Factor de fricción	0,01685		Factor de fricción	0,02024	
Área	0,005079	m ²	Área	0,001142	m ²
Velocidad	1,4336	m/sg	Velocidad	1,274793	m/sg
Reynolds	138131,509		Reynolds	58251,3684	
PERDIDAS	0,2197	m	PERDIDAS	0,4400029	m

TRAMO 3 - SISTEMA A			TRAMO 4 - SISTEMA A		
Diámetro 3"	0,08042	m	Diámetro 1"	0,0302	m
Longitud	456,7	m	Longitud	152,6	m
Caudal	0,005825	m ³ /sg	Caudal	0,001456	m ³ /sg
Rugosidad relativa	1,86E-05		Rugosidad relativa	4,96E-05	
Factor de fricción	0,01761		Factor de fricción	0,1931	
Área	0,00507	m ²	Área	0,0007	m ²
Velocidad	1,1469	m/sg	Velocidad	2,0332	m/sg
Reynolds	110505,207		Reynolds	73566,463	
PERDIDAS	6,7142	m	PERDIDAS	20,588	m

TRAMO 5 - SISTEMA A			TRAMO 6 - SISTEMA A		
Diámetro 3"	0,08042	m	Diámetro 1"	0,0302	m
Longitud	314,3	m	Longitud	160,33	m
Caudal	0,004369	m ³ /sg	Caudal	0,0014564	m ³ /sg
Rugosidad relativa	1,86E-05		Rugosidad relativa	4,96E-05	
Factor de fricción	0,01868		Factor de fricción	0,01931	
Área	0,00507	m ²	Área	0,0007	m ²
Velocidad	0,8601	m/sg	Velocidad	2,0332	m/sg
Reynolds	82878,9054		Reynolds	73566,463	
PERDIDAS	2,7571	m	PERDIDAS	21,631	m

TRAMO 7 - SISTEMA A			TRAMO 8 - SISTEMA A		
Diámetro 3"	0,08042	m	Diámetro 2"	0,05458	m
Longitud	1	m	Longitud	168,41	m
Caudal	0,002912	m ³ /sg	Caudal	0,001456	m ³ /sg
Rugosidad relativa	1,86E-05		Rugosidad relativa	2,74E-05	
Factor de fricción	0,0203		Factor de fricción	0,0218	
Área	0,00507	m ²	Área	0,0023	m ²
Velocidad	0,5734	m/sg	Velocidad	0,6224	m/sg
Reynolds	55252,603		Reynolds	40705,518	
PERDIDAS	0,00425	m	PERDIDAS	1,333	m

TRAMO 9 - SISTEMA A		
Diámetro 2 1/2"	0,06745	m
Longitud	174,6	m
Caudal	0,001456	m ³ /sg
Rugosidad relativa	2,22E-05	
Factor de fricción	0,022932	
Área	0,003573	m ²
Velocidad	0,407603	m/sg
Reynolds	32938,57	
PERDIDAS	0,5031872	m

ANEXO 10: CÁLCULO DE PÉRDIDAS PARA LOS RAMALES Y TRAMOS DE1 SISTEMA B

TRAMO 1 – SISTEMA B			TRAMO 2 - SISTEMA B		
Diámetro 3"	0,08042	m	Diámetro 1, 1/4"	0,03814	m
Longitud	608,8	m	Longitud	471,51	m
Caudal	0,007282	m ³ /sg	Caudal	0,001456	m ³ /sg
Rugosidad relativa	1,86E-05		Rugosidad relativa	3,93E-05	
Factor de fricción	0,0168		Factor de fricción	0,02024	
Área	0,00507	m ²	Área	0,0011	m ²
Velocidad	1,433	m/sg	Velocidad	1,274	m/sg
Reynolds	138131,509		Reynolds	58251,368	
PERDIDAS	13,3788	m	PERDIDAS	20,746	m

TRAMO 3 - SISTEMA B			TRAMO 4 - SISTEMA B		
Diámetro 3"	0,08042	m	Diámetro 2 1/2"	0,06745	m
Longitud	111,01	m	Longitud	120,560	m
Caudal	0,005825	m ³ /sg	Caudal	0,001456	m ³ /sg
Rugosidad relativa	1,86E-05		Rugosidad relativa	2,22E-05	
Factor de fricción	0,01761		Factor de fricción	0,022932	
Área	0,00507	m ²	Área	0,003573	m ²
Velocidad	1,1469	m/sg	Velocidad	0,407603	m/sg
Reynolds	110505,207		Reynolds	32938,57	
PERDIDAS	1,632	m	PERDIDAS	0,347447	m

TRAMO 5 - SISTEMA B			TRAMO 6 - SISTEMA B		
Diámetro 3"	0,08042	m	Diámetro 1, 1/4"	0,03814	m
Longitud	173,19	m	Longitud	207	m
Caudal	0,00436	m ³ /sg	Caudal	0,001456	m ³ /sg
Rugosidad relativa	1,86E-05		Rugosidad relativa	3,93E-05	
Factor de fricción	0,0186		Factor de fricción	0,02024	
Área	0,00507	m ²	Área	0,0011	m ²
Velocidad	0,8601	m/sg	Velocidad	1,2747	m/sg
Reynolds	82878,905		Reynolds	58251,368	
PERDIDAS	1,519	m	PERDIDAS	9,108	m

TRAMO 7 - SISTEMA B			TRAMO 8 - SISTEMA B		
Diámetro 3"	0,08042	m	Diámetro 1, 1/4"	0,03814	m
Longitud	1	m	Longitud	210,9	m
Caudal	0,002912	m ³ /sg	Caudal	0,001456	m ³ /sg
Rugosidad relativa	1,86E-05		Rugosidad relativa	3,93E-05	
Factor de fricción	0,02038		Factor de fricción	0,02024	
Área	0,00507	m ²	Área	0,0011	m ²
Velocidad	0,5734	m/sg	Velocidad	1,2747	m/sg
Reynolds	55252,603		Reynolds	58251,368	
PERDIDAS	0,0042	m	PERDIDAS	9,2796	m

TRAMO 9 - SISTEMA B		
Diámetro 1, 1/4"	0,03814	m
Longitud	818	m
Caudal	0,001456	m ³ /sg
Rugosidad relativa	3,93E-05	
Factor de fricción	0,02024	
Área	0,0011	m ²
Velocidad	1,2747	m/sg
Reynolds	58251,368	
PERDIDAS	35,9922	m

ANEXO 11: ESPECIFICACIONES DEL PANEL AS-6P-340W

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS EN TEC									
Potencia Maxima (P_{max})	300W	305W	310W	315W	320W	325W	330W	335W	340W
Voltaje de Circuito Abierto (V_{oc})	45.3V	45.4V	45.5V	45.6V	45.7V	45.8V	45.9V	46.0V	46.1V
Corriente de Corto Circuito (I_{sc})	8.68A	8.76A	8.85A	8.93A	9.04A	9.15A	9.26A	9.38A	9.50A
Voltaje a Potencia Maxima (V_{mp})	36.7V	36.8V	36.9V	37.0V	37.1V	37.2V	37.3V	37.4V	37.5V
Corriente a potencia Maxima (I_{mp})	8.18A	8.29A	8.41A	8.52A	8.63A	8.74A	8.85A	8.96A	9.07A
Eficiencia del Módulo. (%)	15.46	15.72	15.98	16.23	16.49	16.75	17.01	17.26	17.52
Temperatura de Funcionamiento	-40°C to +85°C								
Voltaje Maximo del Sistema	1000V DC								
Clasificación de Resistencia al Fuego	Tipo 1(De acuerdo con UL1703)Clase C(IEC61730)								
Máxima Clasificación de Fusibles de la Serie	15A								

TEC: Irradiancia 1000W/m², Temperatura de las celdas 25°C, AM1.5

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS EN TNOC									
Potencia Maxima (P_{max})	221W	224W	228W	232W	236W	239W	243W	247W	251W
Voltaje de Circuito Abierto (V_{oc})	41.7V	41.8V	41.9V	42.0V	42.1V	42.2V	42.3V	42.4V	42.5V
Corriente de Corto Circuito (I_{sc})	7.03A	7.10A	7.17A	7.23A	7.32A	7.41A	7.50A	7.60A	7.70A
Voltaje a Potencia Maxima (V_{mp})	33.4V	33.5V	33.6V	33.7V	33.8V	33.9V	34.0V	34.1V	34.2V
Corriente a Potencia Maxima (I_{mp})	6.62A	6.69A	6.79A	6.89A	6.98A	7.05A	7.15A	7.25A	7.34A

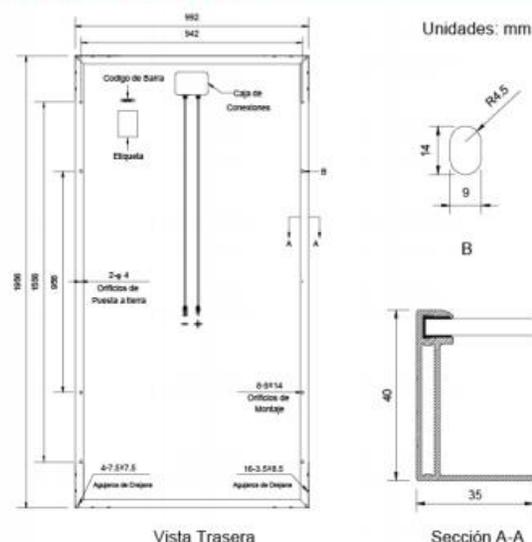
TNOC: Irradiancia 800W/m², Temperatura Ambiente 20°C, Velocidad del viento 1 m/s

CARACTERÍSTICAS MECANICAS	
Tipo de Célula	Policristalino 5BB 156x156mm (6x6pulg)
Numero de Celdas	72 (6x12)
Dimensiones del Modulo	1956x992x40mm (77.01x39.06x1.57pulg)
Peso	22.5kg (49.6lbs)
Cubierta Frontal	3.2mm (0.13pulg) vidrio templado con revestimiento AR
Marco	Aleación de aluminio anodizado
Caja de Conexiones	IP67, 3 diodos
Cable	4mm ² (0.006pulg ²), 1000mm (39.37pulg)
Conector	MC4 o compatible con MC4

CARACTERÍSTICAS DE TEMPERATURA	
Temperatura Nominal de Operacion de Celda (TNOC)	45°C±2°C
Coefficientes de temperatura de P_{max}	-0.41%/°C
Coefficientes de temperatura de V_{oc}	-0.31%/°C
Coefficientes de temperatura de I_{sc}	0.05%/°C

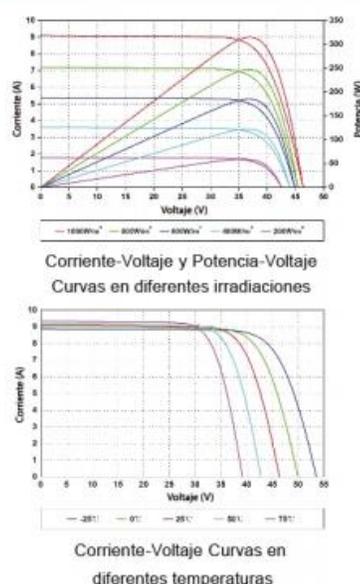
EMBALAJE	
Embalaje Estandar	26 und/pallet
Cantidad de modulos por contenedor de 20'	260 Und
Cantidad de modulos por contenedor de 40'	572und(GP)616/und(HQ)

PLANOS DE INGENIERIA



Las especificaciones en esta hoja de datos están sujetas a cambios sin previo aviso

IV CURVAS



ANEXO 12: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL INVERSOR-VARIADOR SD700SP-HW DE POWER ELECTRONICS.

ENTRADA	Rango de potencia	1,5kw - 560kw ⁽¹⁾
	Tensión	380-500Vac, 3 fases ($\pm 10\%$) 540-900Vcc (830Vcc para tallas 1 y 2)
	Alimentación híbrida	SI, conexión simultánea
	Frecuencia de entrada	50hz/60Hz $\pm 6\%$
	Tecnología rectificador de entrada	Tiristor-diodo
	DPF= $\cos \phi$ / Factor de potencia	≥ 0.98 / ≥ 0.91
	Filtro de entrada EMC	Tallas 1 y 2: Primer entorno (C2 estándar); Tallas 3 a 11: Segundo entorno (Industrial) (C3 estándar); Primer entorno (C2 Opcional). C1 consultar con Power Electronics. Filtro IT opcional.
	THDi (%) corriente / Filtro de armónicos	$\leq 40\%$ / Bobinas de entrada 3% impedancia
	Regenerativo	No
SALIDA	Frecuencia de salida ⁽²⁾	0...200hz
	Capacidad de sobrecarga	Par constante/carga pesada: 150% durante 60s a 50°C
	Eficiencia (a corriente y tensión nominal)	$\geq 98\%$
	Frecuencia de modulación	4 to 8kHz - PEWave
	Filtro dV/dt de salida	500 a 800V/ms ⁽³⁾
	Longitud cable de salida ⁽⁴⁾	No apantallado 300m, Apantallado 150m
CONDICIONES AMBIENTALES	Temp. operación/almacenamiento	-20°C a +50°C / -40°C a +70°C
	Altitud/Reducción de potencia por altitud ⁽¹⁾	1000m / >1000m, 1% Pn(kW) por 100m; 4000m máximo
	Humedad relativa	<95%, sin condensación
	Grado de protección	IP20, IP54
ENTRADAS/ SALIDAS	Entradas digitales	6 programables, activas a nivel alto (24Vcc), Alimentación aislada, 1 entrada PTC
	Salidas digitales	3 relés conmutados configurables (250Vca, 8A or 30Vcc, 8A)
	Entradas analógicas	2 entradas programables y diferenciales: 0-20mA, 4-20mA, 0-10Vcc y $\pm 10Vcc$ (Aislado ópticamente)
	Salidas analógicas	2 salidas configurables aisladas: 0-20mA, 4-20mA, 0-10Vcc y $\pm 10Vcc$
	Entradas encoder (opcional)	2 entradas encoder diferenciales. Tensiones de entrada desde 5 a 24Vcc
	Alimentación usuario	+24Vcc alimentación de usuario (Máx. 180mA) regulada y protegida frente a cortocircuitos +10Vdc alimentación de usuario (Máx. 2 potenciómetros R=1k Ω) regulada y protegida frente a cortocircuitos
	Tarjeta de expansión E/S (opcional)	4 entradas digitales: Entradas programables y activas a nivel alto (24Vcc). (Aislado ópticamente) 1 entrada analógica: Entrada programable y diferencial. 5 salidas digitales: Relés programables multifunción. 1 salida analógica: Salida programable en tensión /corriente.
	Alimentación externa (opcional)	24V Alimentación externa, Relé de fallo integrado

ANEXO 13: SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE PVSYS DE LA INCLINACIÓN ÓPTIMA DEL MÓDULO FOTOVOLTÁICO.

Orientación, Variante "Nueva variante de simulación"

Tipo de campo: Plano Inclinado Fijo

Parámetros del campo

Inclinación plano: 15.0 [°]
Acimut: 0.0 [°]

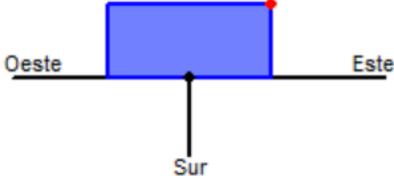
Optimización con respecto a

Irradiación anual
 Verano (Abr-Sept)
 Invierno (Oct-Mar)

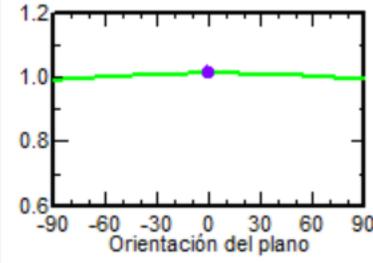
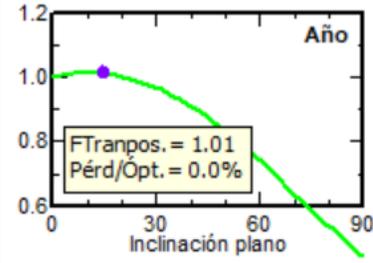
Incl. 15°



Acimut 0°



Año



Anular OK

ANEXO 14: COTIZACIÓN DEL PRESUPUESTO A TODO COSTO DE LA EMPRESA ISMAQ PARA EL TANQUE DE 315 M³



PRESUPUESTO A TODO COSTO

	ACTIVIDAD	CANT	UND	V/UNITARIO	PARCIAL
1	DESCAPOTE Y LIMIEZA DE TERRENO	121	M2	32,000	3,872,000
2	EXCAVACION CON MAQUINA	315.5	M3	73,000	23,031,500
3	CONCRETO LIMPIEZA ESPESOR 0.5 CMTS	120.5	M2	200,000	24,100,000
4	ARMADA DE PARRILLA CON HIERRO 5/8 Y FUNDIDA DE PLACA DE PISO DE ESPESOR 0.30 CMTS Y CONCRETO DE 4.000 PSI	36.45	M3	1,150,000	41,917,500
5	ARMADA DE PARRILLA DOBLE CON HIERRO DE 5/8 CADA 0.15. Y FUNDIDA DE MUROS EN CONCRETO IMPERMEABILIZADO DE 4.000 PSI Y ESPESOR DE 0.30 CMTS	37.5	M3	1,150,000	43,125,000
6	CONSTRUCCION DE PLACA TAPA TANQUE, ARMADA DOBLE PARRILLA EN HIERRO 5/8 ESPESOR 0.30 CMTS CON VIGAS DESCOLGADAS , CONCRETO 4.000 PSI	38.5	M3	1,150,000	44,275,000
7	RETIRO DE ESCOMBROS	10.5	M3	550,000	5,775,000
8	CONSTRUCCION CUARTO DE MAQUINAS	30.25	M2	1,700,000	51,425,000
9	DISEÑO	1	UND	7,000,000	7,000,000
10	ASEO GENERAL	35.5	M2	20,000	710,000
				TOTAL	245,231,000

ISMAQ SAS NIT 901314811-3
CLLE 17 N 24-55 BUCARAMANGA-COLOMBIA
TELF 3166321285
ISMAQ.SAS@GMAIL.COM

ANEXO 15: PROYECCIÓN DE COSTOS DE MANTENIMIENTO A 10 AÑOS PARA LA ALTERNATIVA DE BOMBEO DC

PROYECCIÓN DE COSTOS DEL SISTEMA EN DC											
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Costos de operación y mantenimiento del sistema fotovoltaico		\$ 2.912.408	\$ 2.912.408	\$ 2.912.408	\$ 2.912.408	\$ 2.912.408	\$ 2.912.408	\$ 2.912.408	\$ 2.912.408	\$ 2.912.408	\$ 2.912.408
Costos de operación y mantenimiento del sistema de bombeo		\$ 8.138.250	\$ 8.626.545	\$ 9.144.138	\$ 9.692.786	\$ 10.274.353	\$ 10.890.814	\$ 11.544.263	\$ 12.236.919	\$ 12.971.134	\$ 13.749.402
Inversión inicial	\$ 563.681.267,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	\$ 563.681.267	\$ 11.050.658	\$ 11.538.953	\$ 12.056.546	\$ 12.605.194	\$ 13.186.762	\$ 13.803.223	\$ 14.456.672	\$ 15.149.327	\$ 15.883.542	\$ 16.661.811

ANEXO 16: PROYECCIÓN DE COSTOS DE MANTENIMIENTO A 10 AÑOS PARA LA ALTERNATIVA DE BOMBEO AC

PROYECCIÓN DE COSTOS DEL SISTEMA EN AC											
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Costos de operación y mantenimiento del sistema fotovoltaico		\$ 2.496.453	\$ 2.496.453	\$ 2.496.453	\$ 2.496.453	\$ 2.496.453	\$ 2.496.453	\$ 2.496.453	\$ 2.496.453	\$ 2.496.453	\$ 2.496.453
Costos de operación y mantenimiento del sistema de bombeo		\$ 6.781.875	\$ 7.188.788	\$ 7.620.115	\$ 8.077.322	\$ 8.561.961	\$ 9.075.679	\$ 9.620.219	\$ 10.197.432	\$ 10.809.278	\$ 11.457.835
Inversión inicial	\$ 526.520.976,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	\$ 526.520.976	\$ 9.278.328	\$ 9.685.241	\$ 10.116.568	\$ 10.573.775	\$ 11.058.414	\$ 11.572.132	\$ 12.116.673	\$ 12.693.886	\$ 13.305.732	\$ 13.954.289