

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO ALIMENTADO POR ENERGÍA SOLAR
FOTOVOLTAICA EN LA ZONA DE CUNDINAMARCA**

CÓDIGO DE PROYECTO: PG-21-1-04



KEVIN MAURICIO HOSPITAL MORA

CÓDIGO: 1610263

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1023974029

LUIS DAVID GONZÁLEZ DELGADO

CÓDIGO: 1611337

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1031180609

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTÁ, D.C.**

2021

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO ALIMENTADO POR ENERGÍA SOLAR
FOTOVOLTAICA EN LA ZONA DE CUNDINAMARCA**

KEVIN MAURICIO HOSPITAL MORA

CÓDIGO: 1610263

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1023974029

LUIS DAVID GONZÁLEZ DELGADO

CÓDIGO: 1611337

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1031180609

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
MECATRÓNICO DE LA UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA**

DIRECTOR:

M.SC. CAROLINA SANDOVAL MEJIA

M.Sc en Planeación de Sistemas Energéticos

Esp. en Gerencia de Recursos Energéticos

Ing. en Energía

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA


PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BOGOTÁ, D.C.

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Una vez realizada la revisión metodológica y técnica del documento final de proyecto de grado, doy constancia de que los estudiantes han cumplido a cabalidad con los objetivos propuestos, cumple a cabalidad con los Lineamientos de Opción de Grado vigentes del programa de Ingeniería Mecatrónica y con las leyes de derechos de autor de la República de Colombia, por tanto, se encuentran preparados para la defensa del mismo ante un jurado evaluador que considere idóneo el Comité de Investigaciones del Programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Piloto de Colombia.



M.SC. CAROLINA SANDOVAL MEJIA

Directora del Proyecto

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mi madre, quien me enseñó que con dedicación, esfuerzo y constancia se alcanza todas las metas.

Luis David González Delgado

Dedico esta tesis a todas las personas que hicieron parte de este proceso formativo, a mi pareja, que estuvo apoyándome en cada decisión que tomara, esa mujer que tuvo paciencia y entrega para conmigo.

A mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este. Me formaron con reglas y con algunas libertades, pero al final de cuentas, me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos.

Kevin Mauricio Hospital Mora

AGRADECIMIENTOS

Le damos gracias a Dios por tener tan buena experiencia dentro de esta gran universidad, gracias a mi universidad y a nuestro esfuerzo por permitirnos ser profesionales de esta gran carrera, gracias a cada maestro y principalmente a la ingeniera Carolina Sandoval Mejía y al ingeniero Adonay Moisés Varela Muñoz que guiaron esta investigación e hicieron parte de este proceso integral de formación, que deja como producto y recuerdo esta tesis, que perdurará dentro de los conocimientos y desarrollo de las demás generaciones que están por llegar.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
NOTA DE ACEPTACIÓN	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
INTRODUCCIÓN	10
RESUMEN	11
ABSTRACT.....	11
1. GENERALIDADES	12
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.1.1. Descripción del problema	12
1.1.2. Formulación del problema	12
1.1.3. Línea de investigación del programa.....	13
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	13
1.3. OBJETIVOS.....	13
1.3.1. Objetivo General	13
1.3.2. Objetivos específicos.....	13
1.4. MARCO REFERENCIAL	14
1.4.1. Estado del arte.....	14
1.4.2. Marco normativo	17
1.5. MARCO METODOLÓGICO.....	18
2. PARAMETROS TÉCNICOS DEL SISTEMA DE BOMBEO	20
2.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	20
2.2. CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA	21
2.2.1. Cálculo del caudal para el diseño del sistema	21
2.3. ESTUDIO GEOELÉCTRICO PARA IDENTIFICACIÓN DE ACUIFEROS	23
2.3.1. Método geoelectrico.....	23
2.3.2. Columna estratigráfica de la zona	23
2.3.3. Resultado informe geoelectrico	24
2.4. COMPONENTES DEL SISTEMA DE HIDRÁULICO	25
2.4.1. Entubado.....	25

2.4.2. Filtro de grava	27
2.4.3. Zona de admisión de agua en el pozo.....	29
2.4.4. Sello sanitario y sello bentónico	30
2.4.5. Selección del diámetro de la tubería de descarga	31
2.4.6. Estimación de la pérdida total de energía y la carga total sobre la bomba	32
2.5. DIMENSIONAMIENTO DEL DEPOSITO DE AGUA	36
3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE BOMBEO ..	38
3.1. Cálculo de la potencia que requiere la bomba	38
3.1.1. Selección de bomba y motor	38
3.1.2. Cálculo del NPSH	42
3.1.3. Punto de operación de la bomba	45
3.2. CONSUMO ENERGÉTICO DEL SISTEMA DE BOMBEO	47
4. DISEÑO DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA EL SISTEMA DE BOMBEO ..	48
4.1. BRILLO SOLAR DIARIO EN CHAGUANÍ – CUNDINAMARCA.....	48
4.2. RENDIMIENTO GLOBAL DE LA INSTALACIÓN.....	49
4.3. DIMENSIONAMIENTO DE PANELES FOTOVOLTAICOS.....	50
4.4. CAPACIDAD DE BATERÍAS	52
4.5. DIMENSIONAMIENTO CONTROLADOR DE CARGA	52
4.6. DIMENSIONAMIENTO DEL INVERSOR	54
4.7. DIMENSIONAMIENTO DEL CABLEADO	56
4.7.1. Calibre de cableado Panel - Controlador de carga	58
4.7.2. Calibre de cableado Controlador de carga – Baterías	58
4.7.3. Calibre de cableado Baterías – Inversor	59
4.7.4. Calibre de cableado Inversor – Motor sumergible	59
4.8. PROTECCIÓN CONTRA SOBREENTENSIDADES ORIGINADAS POR SOBRECARGAS O CORTOCIRCUITOS	61
4.8.1. Cableado de protección	62
4.9. ARRANQUE Y PROTECCIÓN DE LA BOMBA SUMERGIBLE.....	63
4.10. ACCIONAMIENTO DE LA BOMBA SUMERGIBLE	66
5. RESULTADOS.....	70
6. CONCLUSIONES	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Consumo total de agua diaria de la población de Chaguaní.	21
Tabla 2. Diámetro de entubado según caudales.	26
Tabla 3. Tubería en PVC 8" para pozo profundo.	26
Tabla 4. Tipos de arenas según su diámetro.	27
Tabla 5. Tipos de gravas comerciales para perforación.	28
Tabla 6. Ventas y desventajas en tipos de rejillas para pozos profundos.	29
Tabla 7. Características filtro de ranura continua PVC 8".....	30
Tabla 8. Factor de fricción de la tubería.	34
Tabla 9. Coeficiente de resistencia en válvulas y acoplamientos.	34
Tabla 10. Características eléctricas del motor sumergible 6MWCP150C163.	42
Tabla 11. Carga de presión de vapor en (m).....	44
Tabla 12. Datos de la curva del sistema y curva de la bomba.	46
Tabla 13. Consumo energético diario en (W) del sistema de bombeo.	47
Tabla 14. Comparación de paneles solares.	51
Tabla 15. Comparación de baterías.	52
Tabla 16. Características de los controladores de carga.	54
Tabla 17. Ficha técnica de los inversores.	55
Tabla 18. Caída de tensión en instalaciones autónomas.....	56
Tabla 19. Intensidades máximas admisibles en instalaciones interiores o receptoras.....	57
Tabla 20. Intensidades máximas admisibles en redes subterráneas para distribución en baja tensión.....	57
Tabla 21. Ficha técnica cable sumergible calibre 4 AWG.	60
Tabla 22. Protecciones asignadas en cada tramo de la instalación.	61
Tabla 23. Características de los cartuchos de fusibles tipo cuchilla gPV.	62
Tabla 24. Parámetros para la selección del cableado de protección.....	63
Tabla 25. Protección de cableado seleccionado en cada tramo de la instalación.	63
Tabla 26. Ficha técnica PUMP monitor monofásico modelo PM23.	64
Tabla 27. Capacitores de arranque y de marcha.	66
Tabla 28. Ficha técnica electronivel modelo EN-3.	68
Tabla 29. Ficha Técnica Del Sistema Hidráulico.....	70
Tabla 30. Ficha Técnica Del Sistema Fotovoltaico.	71

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Metodología del proyecto.....	19
Figura 2. Localización del área de estudio.....	20
Figura 3. Irradiación global horizontal, Chaguaní.	22
Figura 4. Sondeo eléctrico vertical.	23
Figura 5. Metodología de resultados y modelo de capas.	24
Figura 6. Columna litológica.....	24
Figura 7. Rejilla de ranura continua y circulación de agua.	30
Figura 8. Selección de la tubería de descarga.....	31
Figura 9. Diseño final del pozo profundo.	32
Figura 10. Forma y características del depósito de agua.	36
Figura 11. Bomba sumergible.	39
Figura 12. Motor sumergible.	39
Figura 13. Curva de rendimiento bomba sumergible 6PWS230G150.....	40
Figura 14. Dimensiones - 6PWS230G150.....	41
Figura 15. Dimensiones y componentes del motor sumergible 6MWCP150C163V.	42
Figura 16. NPSHR para la bomba 6PWS230G150.	44
Figura 17. Punto de operación de la bomba.	46
Figura 18. Brillo solar diario.	48
Figura 19. Pump monitor modelo PM23.	64
Figura 20. Diagrama de conexión PUMP MONITOR monofásico modelo PM23.....	65
Figura 21. Diagrama de conexión estándar para motores monofásicos.	66
Figura 22. Electronivel modelo EN-3.	67
Figura 23. Electrodo de bronce.	67
Figura 24. Diagrama de conexión electronivel modelo EN-3 y electrodos.	68
Figura 25. Diseño final sistema de bombeo.....	74

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como fin el diseño de un sistema de bombeo alimentado por energía solar fotovoltaica debido a que en ciertas zonas del departamento de Cundinamarca escasea el fluido debido a las sequias que se pueden presentar en ciertas temporadas del año o de la arquitectura del sector donde se requiera agua para el consumo humano u otros fines.

Teniendo en cuenta que el sistema de bombeo se diseñará para la zona rural del municipio de Chaguaní en el departamento de Cundinamarca, debido a que es un sitio donde escasea el fluido y también de energía eléctrica, se da la necesidad de energizar el sistema de bombeo a través de energía solar fotovoltaica, buscando promover indirectamente el uso de energías no convencionales.

Ahora bien, la intención del proyecto es proporcionar el diseño de un sistema de bombeo autónomo y haciendo uso de energías renovables para su accionamiento, con el motivo de almacenar el agua en un tanque, buscando el abastecimiento del agua en las temporadas secas del año para la zona de Cundinamarca.

RESUMEN

Este trabajo surge de la necesidad de dar solución a problemas en el que el agua sea escasa o no haya un suministro del fluido cerca para captarlo en las cantidades que se requiere, por lo que se diseña un sistema de bombeo alimentado mediante energía solar para un pozo profundo, utilizando para su energización paneles solares fotovoltaicos y para su control en el tanque de agua un electronivel que indicará el nivel de llenado, el fluido estará en un reservorio disponible para su utilización.

El diseño fotovoltaico será autónomo y suplirá toda la demanda energética que requiere el sistema de bombeo, lo que se busca es que mediante el diseño del sistema de bombeo se especifique cuáles son los mejores componentes que garanticen el funcionamiento, buscando abastecer del fluido a la zona rural del municipio de Chaguaní, Cundinamarca Colombia.

Palabras Clave: *Agua, energía solar, fotovoltaico, sistema de bombeo.*

ABSTRACT

This work arises from the need to solve problems in which water is scarce or there is no supply of the fluid nearby to capture it in the quantities required, so a pumping system powered by solar energy is designed for a deep well, using photovoltaic solar panels for its energization and for its control in the water tank an electron level that will indicate the filling level, the fluid will be in a reservoir available for use.

The photovoltaic design will be autonomous and will supply all the energy demand required by the pumping system, what is sought is that through the design of the pumping system it is specified which are the best components that guarantee operation, seeking to supply the fluid to the area. rural area of the municipality of Chaguaní, Cundinamarca Colombia.

Keywords: *Water, solar energy, photovoltaic, pumping system.*

1. GENERALIDADES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua es un elemento de la naturaleza, fundamental para el desarrollo y sostenibilidad del planeta, que constituye a un factor indispensable para la realización de cualquier actividad, en ciertas temporadas del año ocurren sequías en zonas del departamento de Cundinamarca, por lo que la Corporación Autónoma Regional (CAR) a corte del mes de enero del año 2021 afirma que “Enero es el mes más seco del año con mínimas precipitaciones, altas temperaturas, intensa radiación solar”¹

Además de la problemática mencionada hay zonas que también carecen del servicio de agua por las características del sector o no satisfacen el consumo de agua mínimo, debido a que son zonas apartadas donde se requiere tanto de suministro eléctrico como de agua.

La energía solar fotovoltaica es un recurso limpio que transforma la luz del sol directamente en electricidad, por lo que esta tecnología posee un gran potencial para utilizarla en sitios apartados y de difícil acceso, por tal motivo este proyecto busca realizar el diseño de un sistema de bombeo por medio de energía solar fotovoltaica para suplir la demanda del recurso hídrico.

1.1.1. Descripción del problema

La problemática que tienen ciertas zonas del departamento de Cundinamarca radica en que no hay correcto suministro de energía convencional y agua para el adecuado desarrollo de cualquier actividad básica, debido a lo anteriormente expuesto, los factores mencionados son de gran importancia solucionar para estas zonas, en efecto para el presente trabajo se toma la zona rural del municipio de Chaguaní del departamento de Cundinamarca, por lo que se busca a través de un diseño de sistema de bombeo alimentado mediante energía solar, dar una alternativa y estudio sólido para esta zona, buscando fomentar el uso de estas tecnologías, mejorando el desarrollo y calidad de vida de los habitantes que lo requieran.

1.1.2. Formulación del problema

¿Cómo diseñar un sistema de bombeo alimentado mediante energía solar fotovoltaica para el beneficio del departamento de Cundinamarca, teniendo como objeto de estudio el municipio de Chaguaní, Cundinamarca Colombia, fomentado proyectos que usen tecnologías amigables con el planeta, debido a que es una zona

¹ CAR. Boletín hidrológico [sitio web]. Bogotá; [Consulado: 10 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://www.car.gov.co/uploads/files/6016f3adb2c66.pdf>

donde se dificulta el suministro de agua y energía, brindando una posibilidad para mejorar su calidad de vida?

1.1.3. Línea de investigación del programa

Energías renovables.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Los motivos que nos llevaron a investigar en como diseñar un sistema de bombeo fotovoltaico mediante energía solar, se centra en las poblaciones más alejadas en zonas del departamento de Cundinamarca, que no poseen los recursos energéticos ni hídricos para realizar sus actividades más básicas, esto implica una gran necesidad que se debe resolver, ya que el agua es un recurso vital para cualquier ser vivo, pues el suministro de agua potable es indispensable para la salud, la industria y la agricultura².

La falta de agua en una zona es un impedimento para poder activar el potencial desarrollo de toda una región, además las zonas no interconectadas que no poseen suministro de electricidad convencional es otro impedimento para el crecimiento social. Por lo tanto, el uso de energías renovables no convencionales además de suplir la demanda energética de dichas zonas, generan un gran impacto ambiental.

De esta manera se pretende realizar un diseño de sistema de bombeo con energía solar fotovoltaica para suplir y cubrir toda la demanda esencial en la zona rural del municipio de Chaguaní, buscando promover y aumentar el desarrollo social y económico.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

- Diseñar un sistema de bombeo alimentado mediante energía solar fotovoltaica para el beneficio del departamento de Cundinamarca, teniendo como objeto de estudio el municipio de Chaguaní, Cundinamarca Colombia.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar y establecer los parámetros técnicos del sistema de bombeo.

² EACNUR. Escasez de agua en el mundo: causas y consecuencias [sitio web]. Madrid; [Consultado: 15 de marzo de 2021]. Disponible en: https://eacnur.org/blog/escasez-agua-en-el-mundo-tc_alt45664n_o_pstn_o_pst/

- Caracterizar la demanda energética del sistema de bombeo con el fin de diseñar el sistema fotovoltaico.
- Diseñar el sistema fotovoltaico garantizando los requerimientos energéticos mínimos para el correcto funcionamiento del sistema.

1.4.MARCO REFERENCIAL

1.4.1. Estado del arte

El estudio basado de la recopilación de base de datos de material bibliográfico para el seguimiento y gestión del proyecto que aporte de manera adecuada al proyecto como artículos, noticias y publicaciones científicas. Dentro de esos se hace alusión a los siguientes:

Como dice Pedraza³, en su proyecto de riego, utilizando energía solar para el cultivo de limones en la finca contador del municipio de Vianí, el trabajo de grado se basa en los ecosistemas acuáticos de agua dulce como lagos, humedales, lagunas, estuarios y ríos, ocupan el 1% del total de la superficie terrestre y mantienen al 9,5% de especies nativas, el proyecto se fundamenta en la implementación de energía fotovoltaica, con el ideal de producir 70% del suministro necesario para el cultivo de limones a través de una red de diseño hidráulico el cual aprovecha las medidas de una bomba cuyo consumo es suplido por el sistema de energía renovable que ejerce un mayor control en la operación de ahorro de energía.

Arceda y Hernández⁴, expresa en su proyecto de riego por goteo utilizando energía solar para el cultivo de aguacate en la finca ojo de agua en la localidad de san francisco libre, el proyecto de grado consiste en identificar una región cercana de la ubicación del cultivo de aguacate para la extracción de agua y aplicarla a un sistema de riego que aplica la técnica de goteo, este método es más eficiente que el método de rocío ya que no genera tanto desperdicio, se determina los niveles de terreno cerca del cultivo para la implementación de un sistema de tuberías según la función del sistema permitiría mejor la distribución del agua y el almacenaje, la parte electrónica será alimentada por medio de energía solar, con este diseño el sistema

³ PEDRAZA BELTRAN, Cristian Gonzalo. Proyecto de riego utilizando energía solar para el cultivo de limones en la finca contador del municipio de Vianí [en línea]. Trabajo de grado Especialista en gerencia integral de proyectos. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería. 2020. 15 p. [Consultado: 10 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/36184/PedrazaBeltranCristianGonzalo2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

⁴ ARCEDA, Milton Rafael y HERNÁNDEZ FLORES, Ahiezer David. Proyecto de riego por goteo utilizando energía solar para el cultivo de aguacate en la finca ojo de agua en la localidad de san francisco libre [en línea]. Trabajo monográfico Ingeniero Agrícola. Managua: Universidad nacional de ingeniería. Facultad tecnología de la construcción. Departamento de Ingeniería. 2012. 118 p. [Consultado: 10 de 03 de 2021]. Disponible en: <https://ribuni.uni.edu.ni/1090/1/38223.pdf>

de riego se aplicara a 1.11 manzanas o lo equivalente 0.777 hectáreas de cultivo, la cantidad de agua adecuada para la siembra se sujeta a una recopilación de datos que detallaría la cantidad de goterones que necesita cada árbol y a través del cálculo el volumen del tanque que dará las presiones mínimas del sistema para el óptimo funcionamiento.

Moreno, Bedoya y López⁵, manifiesta en su investigación modelo a escala de un sistema de riego automatizado, alimentado con energía solar fotovoltaica: nueva perspectiva para el desarrollo agroindustrial colombiano es un artículo que investiga el ámbito mundial, el suministro de recursos básicos como agua y energía eléctrica, se estudia dispositivos que permitan automatizar el proceso ante un aumento exponencial en áreas específicas como agronomía, hidráulica y energía fotovoltaica.

Arrieta y Puello⁶, enuncia en su diseño y construcción de un seguidor solar para aumentar el rendimiento energético en paneles fotovoltaicos de un sistema de bombeo, el proyecto de grado efectuado en el departamento de Córdoba, según la situación de geografía emite una radiación óptima de 5KW/m²/día que favorece la implementación de paneles solares que busca recaudar energía fotovoltaica, la aplicación del estudio busca que los residentes de zonas rurales ahorren entre un 15-20% de energía, el proyecto hace énfasis en el diseño de un sistema autónomo de seguimiento solar por medio de actuadores lineales que busca combinar un diseño robusto con una implementación de bajo nivel de requerimiento técnico.

Rua, Cely, Gonzáles, Granados y Ramírez⁷, enuncia en su diseño estructural de transporte para sistema de bombeo portátil activado con energía solar fotovoltaica para el departamento de Boyacá, en los sistemas de bombeo fotovoltaico la

⁵ MORENO GARCÍA, Flor; FIERRO BEDOYA, Juan y LÓPEZ MARTÍNEZ, German Arturo. Modelo a escala de un sistema de riego automatizado, alimentado con energía solar fotovoltaica: nueva perspectiva para el desarrollo agroindustrial colombiano. En: *Tecnura* [en línea]. Bogotá: Universidad distrital francisco José de caldas, diciembre de 2013. vol. 17, nro. 2. p. 33-47. [Consultado: 10 de marzo de 2021]. Disponible en <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/7221/8871>

⁶ ARRIETA MORELO, Denis Javier y PUELLO BRAVO, Sara Yaneth. Diseño y construcción de un seguidor solar para aumentar el rendimiento energético en paneles fotovoltaicos de un sistema de bombeo [en línea]. Trabajo de grado Ingeniería mecánica. Montería: Universidad de Córdoba. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería. 2015 170 p. [Consultado: 10 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/700/Documento%20final%20Seguidor%20solar%20correcciones%20impresion.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

⁷ RUA, R.E; GONZÁLES, A; GRANADOS, A y RAMÍREZ, R. Diseño estructural de transporte para sistema de bombeo portátil activado con energía solar fotovoltaica para el departamento de Boyacá. En: *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*. Universidad de Pamplona, enero, 2019, nro. 2. p. 1-11. ISSN 1900-9178.

demanda de agua se especifica por día, por lo que el siguiente factor en consideración es el uso que se pretende dar al agua bombeada. Las aplicaciones típicas y rentables son aquellas de relativa baja demanda como abrevaderos para ganado y consumo humano. El riego de parcelas de cultivo por lo general no es costeable debido a su gran demanda de agua y bajo valor de las cosechas obtenidas. La excepción es cuando se trata de parcelas e invernaderos con sistemas de riego eficientes y cultivos con baja demanda de agua.

Como expresa Rojas⁸, el diseño del sistema de bombeo para el abastecimiento óptimo de agua potable del distrito de Huancán-Huancayo, la siguiente investigación hace énfasis en un sistema de bombeo óptimo para la extracción de agua potable, la metodología empleada usa sistemas hidráulicos para coordinar el sistema de bombeo con un sistema de dos bombas multietapa de eje vertical que implementa una función en paralelo con métodos algebraicos, donde se recolecta una base de datos con diferentes variables asociadas en la mecánica de fluidos, los resultados de esta investigación fue la recolección de 80 l/s de agua con una eficiencia de cada bomba del 80% .

Callisaya⁹ expone que, en el diseño del sistema de bombeo fotovoltaico para la comunidad de Machamarca, el presente trabajo de grado se destina a estudiar la conversión de energía solar y el impacto a comunidades rurales donde no hay suministro de fuentes hídricas, los sistemas de bombeo fotovoltaicos se caracterizan por su largo tiempo de vida y poco mantenimiento, de manera que se pueda almacenar agua en un tanque con la finalidad de proveer agua, para el consumo humano y ganadero.

Como manifiesta Sosa¹⁰, el diseño del sistema de bomba solar utilizando bomba sumergible híbrido con variador de velocidad para la comunidad QUENAJAJA del

⁸ ROJAS PÉREZ, Dany Erikson. Diseño del sistema de bombeo para el abastecimiento óptimo de agua potable del distrito de Huancán-Huancayo [en línea]. Tesis Ingeniero mecánico. Huancayo: Universidad nacional del centro del Perú. Facultad de Ingeniería Mecánica. Departamento de Ingeniería. 2017. 127 p. [Consultado: 12 de marzo de 2021]. Disponible en: <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3677/Rojas%20Perez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

⁹ CALLISAYA CAHUAYA, José Antonio. Diseño del sistema de bombeo fotovoltaico para la comunidad de Machamarca [en línea]. Proyecto de grado para la obtención del Grado de Licenciatura. La Paz: Universidad mayor de San Andrés. Facultad de Tecnología. Departamento de electricidad. 2013. 232 p. [Consultado: 12 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/bitstream/handle/123456789/9579/PG-1339-Callisaya%20Cahuaya%2c%20Jos%c3%a9%20antonio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

¹⁰ SOSA CUTIPA, Elver Demetrio. Diseño del sistema de bomba solar utilizando bomba sumergible híbrido con variador de velocidad para la comunidad Quenafajja del distrito de Acora provincia de Puno [en línea]. Tesis Ingeniero Mecánico Electricista. Puno: Universidad nacional del altiplano.

distrito de Acora provincia de Puno, estudio de grado basado en la limitación de recursos hídricos y planes de contramedida con energías renovables, en el siguiente estudio se realizaron análisis a comunidades rurales donde el abastecimiento de agua es limitado y se busca explotar recursos hídricos subterráneos por medio del diseño e implementación de un conjunto de estudios como energía solar fotovoltaica, hidráulica y automatización, que conllevaran al funcionamiento óptimo del sistema de bombeo de agua potable, el agua extraída del pozo profundo pasa por un tratamiento que regula no niveles de pH y la hacen apta para el consumo humano.

Hidrobo y Bonilla¹¹ sostiene en su diseño de un sistema de turbo bombeo y riego por aspersión en la comunidad de san francisco de Cunuguachay, proyecto de grado en la comunidad de san francisco sobre una extensión de terreno de 40 hectáreas cuya economía está creciendo y se presenta un entorno donde toda el área cultivada debe tener un nivel óptimo de producción, se estima un sistema de bombeo con un estudio sobre técnicas de riego idóneo para el clima de la región, explotando las reservas hídricas como lagos y ríos con turbo motores adecuados en una red de túneles perpendiculares que se extienda sobre 40 hectáreas y aplicando un sistema de rocío en tiempos fraccionados para evitar el desperdicio del fluido, con este proyecto se garantiza no depender de condiciones climáticas para el riego de cultivos.

1.4.2. Marco normativo

Estudio de la ley de la Republica de Colombia para el desarrollo y gestión de proyecto siguiendo todo el lineamiento de la constitución de 1992.

Se implementa la ley 697 en la cual se hace énfasis de promover el uso de energías renovables, fue aplicado durante octubre del 2001 por el Ministerio de Minas y Energía Luis Ramiro Valencia Cossío del partido centro democrático. El cual expido la ley con el objeto de promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como

Facultad de ingeniería mecánica eléctrica, electrónica y sistemas. Departamento de ingeniería mecánica eléctrica. 2017. 159 p. [Consultado: 12 de marzo de 2021]. Disponible en: http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/6323/Sosa_Cutipa_Elver_Demetrio.pdf?sequence=1&isAllowed=y

¹¹ HIDROBO NINA, Fausto Octavio y BONILLA VASCONEZ, Jorge Luis. "Diseño de un sistema de turbobombeo y riego por aspersión en la comunidad de san francisco de Cunuguachay [en línea]. Tesis Ingeniero Mecánico. Riobamba: escuela superior politécnica de Chimborazo. Facultad de mecánica. Departamento de ingeniería. 2011. 259 p. [Consultado: 13 de 03 de 2021]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/1387>

medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético.¹²

Después de 13 años se crea y se mantiene la Ley 1715 de 2014, hasta el vigente año "Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional."¹³

Con esta implementación se brindarán los siguientes beneficios para la gestión de proyectos de energías renovables no nocivas para el medio ambiente con incentivos tributarios que otorga el Estado por realizar proyectos con energías renovables, a través de la Ley 1715 de 2014, como:

- Deducción en el pago del impuesto de renta del 50% de las inversiones en un período de 5 años.
- Depreciación acelerada de los activos.
- Exclusión de IVA de los bienes asociados al proyecto.

El decreto 1541 de 1978 sobre la explotación de fuentes hídricas y apertura de pozos subterráneos decretado por el artículo 1 que tiene por finalidad reglamentar las normas relacionadas con el recurso de agua en todos sus estados y comprende los siguientes aspectos.

- El dominio de las aguas, cauces y riberas, y las normas que rigen su aprovechamiento sujeto a prioridades, en orden a asegurar el desarrollo humano, económico y social, con arreglo al interés general de la comunidad.
- La reglamentación de las aguas, ocupación de los cauces y la declaración de reservas y agotamiento, en orden a asegurar su preservación cuantitativa para garantizar la disponibilidad permanente del recurso.
- Las restricciones y limitaciones al dominio en orden a asegurar el aprovechamiento de las aguas por todos los usuarios.

1.5.MARCO METODOLÓGICO

La gestión del proyecto inicia desde el estudio de las características que requiere el sistema de bombeo con base al estudio geoelectrónico, siguiendo a la selección de los elementos hidráulicos y electrónicos para así establecer y caracterizar la demanda energética del sistema, terminando con el diseño del sistema fotovoltaico garantizando el correcto funcionamiento del sistema de bombeo.

¹² SECRETARIA GENERAL DEL SENADO. Energías Limpias [sitio Web]. Bogotá; [Consultado: 14 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://senado.gov.co/index.php/component/content/article/13-senadores/143-un-atentado-contras-las-energias-limpias>

¹³ MINISTERIO DE ENERGÍA. Energías Renovables No Convencionales [sitio Web]. Bogotá; [Consultado: 14 de marzo del 2021]. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/energias-renovables-no-convencionales>

Por lo anteriormente dicho se plasma en el siguiente esquema la metodología del presente proyecto.

Figura 1. Metodología del proyecto.



Fuente: Autor.

2. PARAMETROS TÉCNICOS DEL SISTEMA DE BOMBEO

Abordan la parametrización de los factores que intervienen en el sistema de bombeo con la descripción de la zona de estudio, buscando así, especificar el consumo de agua para la población, de este modo saben las necesidades hídricas de la zona y proceden a dimensionar la tubería y demás elementos del pozo profundo, obteniendo las pérdidas de energía del sistema y la carga total sobre la bomba, finalmente, dimensionan el tanque de agua.

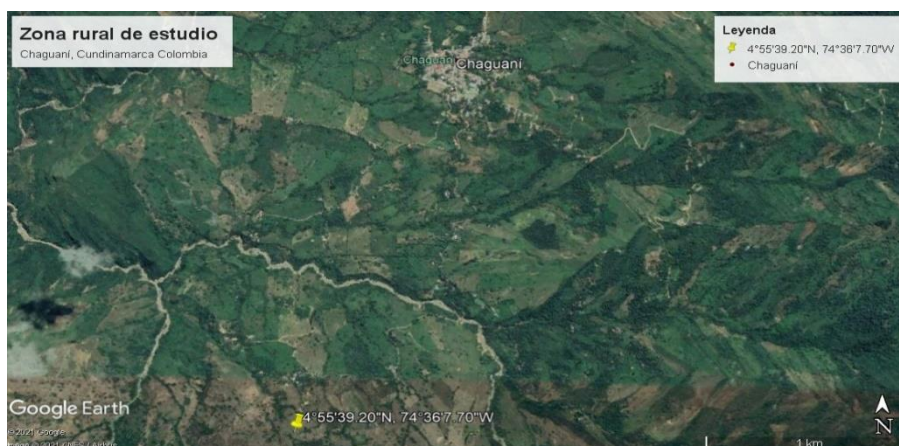
2.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para el diseño del sistema de bombeo consideraran las siguientes características demográfica que son particulares de la zona de estudio, para así establecer el consumo hídrico que requiere la comunidad.

Chaguaní es un municipio de Cundinamarca el cual posee una extensión de 142 Km² con una población total de 3984 habitantes, así el 19% de su población son de área urbana y el 84% rural, además posee una temperatura de 23.2°C promedio¹⁴.

El área de estudio la establecen en la zona rural del municipio de Chaguaní que corresponde a las siguientes coordenadas 4°55'39.20"N, 74°36'7.70"W.

Figura 2. Localización del área de estudio.



Fuente: Google Earth.

¹⁴ PROGRAMA DESARROLLO PARA LA PAZ DEL MAGDALENA CENTRO. Chaguaní, Cundinamarca [sitio web]. La dorada; [Consulado: 5 de mayo de 2021]. Disponible en: [https://pdpmagdalenacentro.org/pagina2017/sistema-de-informacion-irmac-chaguani/#:~:text=Chaguan%C3%AD%2C%20Cundinamarca.,departamental%20\(de%20116%20municipios\).](https://pdpmagdalenacentro.org/pagina2017/sistema-de-informacion-irmac-chaguani/#:~:text=Chaguan%C3%AD%2C%20Cundinamarca.,departamental%20(de%20116%20municipios).)

2.2. CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA

Chaguaní debido a que es un municipio en el que la gran parte de su población reside en la zona rural, determinaron establecer el sistema de bombeo para el 10% de la población de esta área, supliendo las necesidades hídricas mínimas que requiere este grupo de personas y en consecuencia se proveerá la demanda del consumo de sus animales y cultivos agrícolas.

Para ello la organización mundial de la salud establece que “Cada persona necesita al día entre 20 y 50 litros de agua sin contaminantes químicos ni microbianos nocivos, para beber y para la higiene”¹⁵, de modo que, la siguiente tabla describe la cantidad total del consumo diario de litros de agua que requiere la población, es de aclarar que los consumos allí relacionados fueron tomados de un estudio realizado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca¹⁶.

Tabla 1. Consumo total de agua diaria de la población de Chaguaní.

Descripción	Cantidad	Consumo de agua por unidad en litros	Consumo total en litros
Personas	335	20	6.700
Bovínos	268	45	12.060
Porcícola	201	15	3.015
Equino	47	20	940
Avícola	669	0	167
Cultivos agrícolas (Agua de riego)	40.000	1	40.000
Consumo total de agua diaria de la población en litros.			62.882

Fuente: Autor.

2.2.1. Cálculo del caudal para el diseño del sistema

Se establece para la población de Chaguaní un consumo de agua diario de 62882 litros o bien $62.882 m^3$, esta zona presenta un promedio de número de días al mes sin brillo solar de 2 días en el peor de los casos, involucran un respaldo en el depósito del líquido, proyectando agua para 3 días y obtienen un volumen total aproximado de $190m^3$, esto con el fin de prever situaciones de épocas con baja o

¹⁵ ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Cambio climático y salud humana: Servicios de aguas para la salud [sitio Web]. Bogotá; [Consultado: 7 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.who.int/globalchange/ecosystems/water/es/#:~:text=Cada%20persona%20necesita%20al%20d%C3%ADa,beber%20y%20para%20la%20higiene>

¹⁶ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Estudio para la determinación de módulos de consumo del recurso hídrico de las 10 cuencas de 2do orden y las ochenta y cuatro cuencas de 3er orden Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR [sitio Web]. Bogotá; [Consultado: 7 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://sie.car.gov.co/handle/20.500.11786/33671>

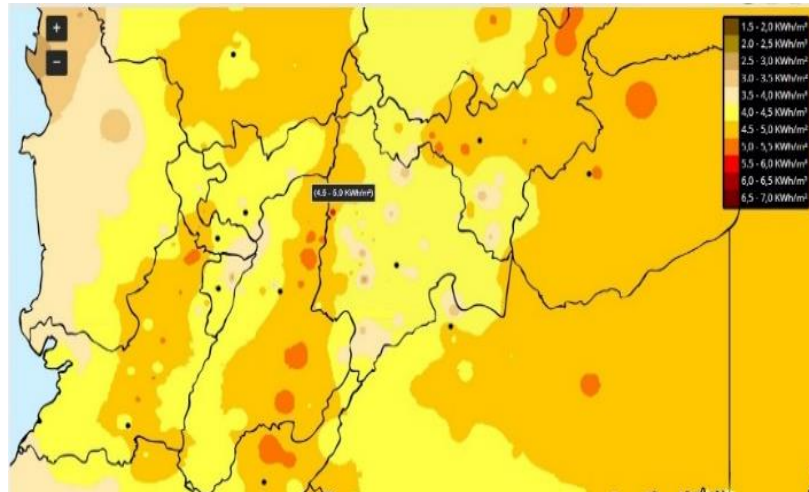
nula disponibilidad de radiación solar, buscando suplir los requerimientos en las épocas críticas.

La insolación solar diaria la calcularon con la siguiente formula:

$$I_n = \frac{\text{Radiación solar } \frac{KWh}{m^2}}{\text{Potencia nominal paneles } \frac{KW}{m^2}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

La Radiación solar en el municipio de Chaguaní en su peor mes según el Atlas radiación solar y ozono de Colombia¹⁷ de es de $4.5 \frac{KWh}{m^2}$ ver la siguiente figura.

Figura 3. Irradiación global horizontal, Chaguaní.



Fuente: ATLAS. Irradiación global horizontal media diaria [imagen]. [Consultado: 14 de julio de 2021]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

La potencia nominal que utilizan los fabricantes en sus paneles es de $1 \frac{KW}{m^2}$, en consecuencia, la insolación solar será:

$$I_n = \frac{4.5 \frac{KWh}{m^2}}{1 \frac{KW}{m^2}} = 4.5h \quad (\text{Ecuación 1a})$$

Teniendo este dato se procede a establecer el régimen de bombeo o caudal requerido, que es el volumen total de agua que se bombea en las horas de mayor insolación solar.

¹⁷ ATLAS. Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia. [sitio Web]. Bogotá; [Consultado: 1 de junio del 2021]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

$$Q_r = \frac{V_r}{I_n} = \frac{190 \text{ m}^3}{4.5 \text{ h}} = 42.2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

2.3. ESTUDIO GEOELÉCTRICO PARA IDENTIFICACIÓN DE ACUIFEROS

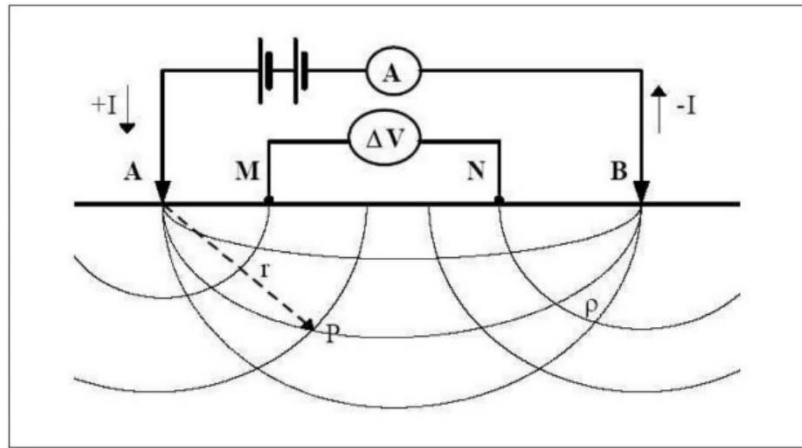
El grupo investigador adquirió e interpretó un informe en el que se muestra el resultado de la adquisición de datos de resistividad a través de un sondeo eléctrico vertical, que es llevado a cabo en las coordenadas 4°55'39.20"N, 74°36'7.70"W, zona rural del municipio de Chaguaní departamento de Cundinamarca, cuya finalidad es determinar la estratigrafía del subsuelo y sus condiciones hidrogeológicas para la exploración de un pozo subterráneo.

2.3.1. Método geoelectrico

La prospección geofísica se realizó utilizando el método geoelectrico, consistente en determinar las resistividades del subsuelo a diferentes profundidades para luego dar una interpretación litológica de éste.

Para la presente prospección geofísica se efectuaron un sondeo eléctrico vertical (SEV's), consistentes en un arreglo lineal tipo Schlumberger de cuatro electrodos, con AB/2 máximo 200 m.

Figura 4. Sondeo eléctrico vertical.

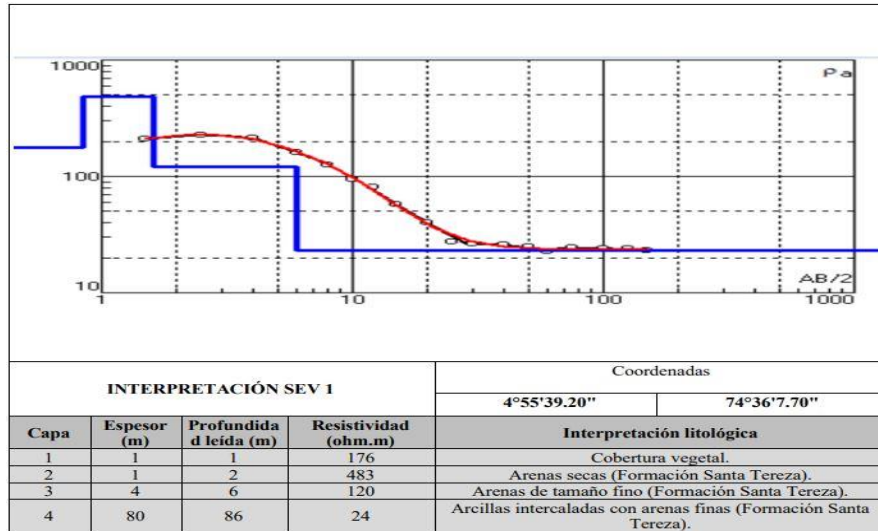


Fuente: Informe empresa geoelectrica.

2.3.2. Columna estratigráfica de la zona

Las curvas generadas las interpretan y correlacionan con el fin de obtener una sección geoelectrica del subsuelo que muestran la continuidad o discontinuidad de las capas espacialmente. En la siguiente figura se muestra la caracterización litológica correspondiente los datos de resistividad.

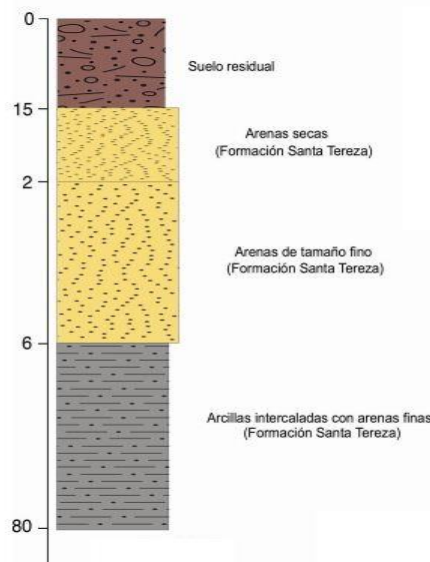
Figura 5. Metodología de resultados y modelo de capas.



Fuente: Informe empresa geoelectrica.

Ahora bien, con base en la resistividad y la interpretación litológica para la zona de estudio se obtiene el siguiente perfil litológico.

Figura 6. Columna litológica.



Fuente: Informe empresa geoelectrica.

2.3.3. Resultado informe geoelectrico

A modo de cierre se debe recordar que la geofísica y la tomografía es un método económico y rápido para analizar las estructuras del subsuelo, en donde se puede

obtener perfiles de resistividad de las formaciones, pudiéndose identificar algunas tendencias. Por esta razón siempre es necesario corroborar la información obtenida en campo con perforaciones exploratorias y correlacionarlas con sondeos y perfiles para que de esta manera se pueda tener información más exacta de la geología subterránea del sector.

De acuerdo con el modelo geoelectrico obtenido del SEV-1 se presentan un (1) zonas de posible descarga acuíferas de interés para extracción de agua subterránea, que se correlacionan con las unidades geoelectrica, geológicas y se presenta aproximadamente entre los 50 hasta 80 metros de profundidad.

En resumen, con los resultados obtenidos de la lectura de campo del SEV-1 el espesor del sistema acuífero y los requerimientos de caudal, la perforación se llevará a cabo hasta la profundidad de aproximada de 80 metros esto con el fin de tener un mejor caudal con el fin de aprovechar las condiciones litoestratigráficas.

2.4.COMONENTES DEL SISTEMA DE HIDRÁULICO

El diseño de pozos consiste en especificar sus materiales y dimensiones para que este contenga la mayor eficiencia posible, buscando asegurar los siguientes criterios:

- Excelente calidad de agua.
- Vida útil del pozo (25 años o más).
- Agua libre de arena.
- Costos bajos a corto y largo plazo.

Desde entonces proceden a definir todos los parámetros que requiere el diseño del pozo profundo para especificar el mismo.

2.4.1. Entubado

El entubado del pozo es fundamental debido a que despeña las siguientes dos misiones fundamentales, Vélez afirma que las dos misiones son “Sostener las paredes de la perforación y constituir la conexión hidráulica que pone el acuífero en comunicación con la superficie de terreno o con los elementos de extracción correspondientes”¹⁸.

Para tal fin se debe tener en cuenta que el ancho del entubado debe permitir una eficiente instalación de la bomba y que genere la menor cantidad de pérdidas por fricción, por lo que recomiendan que sea dos unidades mayor que el diámetro

¹⁸ VÉLEZ OTÁLVARO, María Victoria. Hidráulica de Aguas Subterráneas. 3ra edición. Colombia; Universidad Nacional de Colombia, 2011. 275 p. ISBN: 958-9352-88-3.

nominal de la bomba, en la siguiente tabla mostramos los entubados recomendados a diferentes caudales.

Tabla 2. Diámetro de entubado según caudales.

Caudal l/s	Diámetro nominal tazonos (pul)	Diámetro óptimo (pul)	Diámetro Mínimo (pul)
<6	4	6 DI	5 DI
5-11	5	8 DI	6 DI
10-25	6	10 DI	8 DI
22-41	8	12 DE	10 DI
38-57	10	14 DE	12 DI
54-82	12	16 DE	14 DE
76-114	14	20 DE	16 DE
101-189	16	24 DE	20 DE

Fuente: VÉLEZ OTÁLVARO, María Victoria. *Diámetros de entubado recomendados. Hidráulica de aguas subterráneas. 3 ed. Medellín: 2011, 275 p.*

Ahora bien, para la selección del material del entubado, el PVC es frecuentemente utilizado para pozos con profundidades menores a 300 metros y para agua altamente corrosiva, es de aclarar que el acero, fibra de vidrio y asbesto-cemento también son muy utilizados.

Entonces, como nuestro caudal es de $42.2 \frac{m^3}{h}$ o bien $11.72 \frac{l}{s}$ establecemos que nuestro entubado recomendado será, tubería en PVC acampanada RDE 21 con diámetro nominal 8" (pulgadas), a continuación, mostramos las especificaciones de la tubería seleccionada.

Tabla 3. Tubería en PVC 8" para pozo profundo.

Tubería Acampanada						
RDE 21						
Diámetro Nominal pulg.	Referencia	Peso Kg/m	Diámetro Exterior Promedio		Espesor de Pared Mínimo	
			mm	pulg	mm	pulg
8	0271302002	10,404	219,03	8,623	10,41	0,409

Fuente: PAVCO. *Tuberías para pozos profundos [en línea]. [Consultado: 9 de julio de 2021]. Disponible en: <https://pavco.com.co/download/18>*

2.4.2. Filtro de grava

El filtro de grava es muy provechoso cuando hay materiales uniformes y con gran cantidad de finos y también si la rejilla es demasiado pequeña, Vélez afirma respecto al material del filtro que, “El material del filtro debe consistir de granos redondeados, limpios y de tamaño uniforme (materiales lavados de ríos), lo que incrementa la porosidad y permeabilidad del material. Son preferibles materiales con más partículas silíceas que calcáreas”¹⁹. Para tal fin, nuestro filtro de grava Vélez²⁰ sugiere que el espesor del filtro de grava debe ser al menos de 76mm y no debe exceder los 200mm, dicho esto nuestro filtro de grava estará a 76.2mm. A continuación, mostraremos la clasificación de las arenas según su diámetro.

Tabla 4. Tipos de arenas según su diámetro.

Arena	Diámetros
Gravilla fina	1,00 - 9,50 mm (#10-3/8")
Arena gruesa	0,60 - 2,00 mm (#30-#10)
Arena media	0,25 - 0,60 mm (#60 - #30)
Arena fina	0,074 - 0,25 mm (#200 - #60)
Limo y arcilla	Menor de 0,074 mm

Fuente: LLANCA BLAS, Wilkin Rojas. *Clasificación de las arenas según su diámetro [en línea]. Diseño de un sistema hidráulico de extracción de agua salobre de pozo profundo para satisfacer la demanda de planta de tratamiento de agua para la empresa Corporación Lindley S.A. – Pucusana. Perú: 2015. 105p. [Consultado: 8 de julio de 2021]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12952/1507>*

Con el fin de calcular el filtro de grava, cuando se esté perforando el pozo se debe determinar metro a metro el perfil estratigráfico de la explotación del subsuelo, con la finalidad de establecer la curva granulométrica exacta del mismo, para este proyecto estableceremos el diámetro medio ($D_{50} = D_m$) con base al informe geoelectrónico de la zona.

De manera análoga el tamaño efectivo (TE) Llanca expone que “Es el parámetro que relaciona la finura de la arena con la permeabilidad; en este, el 90% del tamaño de la arena es más grueso y el 10% más fino, o sea que el tamaño efectivo correspondiente a la abertura del tamiz que retiene el 90% del material (D_{90}), lo cual

¹⁹ *Ibíd.*, p. 286

²⁰ *Ibíd.*, p. 287.

quiere decir que el 10% de las partículas de la arena tiene un diámetro inferior al tamaño efectivo”²¹.

Una vez establecida la curva granulométrica se determina el coeficiente de uniformidad que es la relación de material que retiene la abertura del tamiz correspondiente al 90% y 40%.

$$C_u = \frac{D_{40}}{D_{90}} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

De acuerdo con Llanca, es recomendable engravar el acuífero artificialmente cuando el $C_u < 2.5$ y el diámetro efectivo es menor de 0.3mm es decir $D_{90} < 0.3mm$, de no cumplirse alguna de las dos situaciones anteriormente expuestas, también es necesario engravar el acuífero.

En efecto para la selección del filtro de grava, establecemos que se debe engravar artificialmente el acuífero y se elige el diámetro medio de la muestra ($D_{50} = D_m = 0.074mm$) con base en el informe geoelectrico y a la tabla 3.

Ahora multiplicamos $D_{50} * 5 = 0.37$ debido a que el estrato es fino y uniforme. Por ese motivo la grava que requiere nuestro pozo es la N° 50 que se ve en a tabla 5 que exhibimos a continuación con diámetros extremos de 0.1 a 0.4 mm.

Tabla 5. Tipos de gravas comerciales para perforación.

Especificaciones comerciales de gravas para perforación		
N°	Diámetro (mm)	Peso Específico (gr/ cm ³)
50	de 0,1 a 0,4	1,5

Fuente: LLANCA BLAS, Wilkin Rojas. *Tamaño de la grava comercial para pozos [en línea]. Diseño de un sistema hidráulico de extracción de agua salobre de pozo profundo para satisfacer la demanda de planta de tratamiento de agua para la empresa Corporación Lindley S.A. – Pucusana. Perú: 2015. 108p. [Consultado: 8 de julio de 2021]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12952/1507>*

²¹ LLANCA BLAS, Wilkin Rojas. *Diseño de un sistema hidráulico de extracción de agua salobre de pozo profundo para satisfacer la demanda de planta de tratamiento de agua para la empresa Corporación Lindley S.A. – Pucusana [en línea]. Tesis Ingeniero Mecánico. Perú: Universidad nacional del callao. Facultad de ingeniería mecánica – energía. 2015. 227 p. [Consultado: 8 de julio de 2021]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12952/1507>*

2.4.3. Zona de admisión de agua en el pozo

La zona de admisión de agua al pozo se realiza por medio de una rejilla, esta rejilla retiene materiales sueltos, permite que el agua entre al pozo sin pérdida de carga y no debe dejar pasar material fino durante el bombeo, por tal motivo la rejilla es el componente más importante de cualquier pozo.

Una rejilla según Vélez²² debe presentar las siguientes características en cuanto a diseño y construcción de la misma:

- Debe evitar la aglomeración de arena o grava.
- Gran cantidad de área abierta, con resistencia mínima.
- El material debe ser en un solo metal, resistente a la corrosión y a los ácidos para desincrustar los elementos que se encuentren en la rejilla cuando se realice mantenimiento al pozo.
- Gran resistencia al colapso y compresión.
- Bajo costo

2.4.3.1. Tipos de rejillas

En el diseño de pozos hay variedad de tipos de rejillas que varía su forma y la distribución de orificios entre otras particularidades, Llanca compara los diferentes tipos de rejillas más utilizadas como se muestra a continuación:

Tabla 6. Ventas y desventajas en tipos de rejillas para pozos profundos.

Tipos de rejillas	Ventajas	Desventajas	Superficie eficaz
Ranura Continua	Debido al diseño de su abertura e material fino no lo puede obstruir brinda más área de captación por metro, que otros tipos.	Necesitan empaque de grava granulometría muy fina y el costo de fabricación es mayor a los demás tipos de filtros.	Hasta de 40%
Tipo Persiana	Se fabrican hasta 12 m de largo, alta resistencia al colapso. Diámetro interior uniforme.	Poco frecuente requiere de filtro artificial. Apertura mirando hacia afuera crea variaciones de empaque.	Hasta de 8%
Tipo Puente	Bajo costo relativo, con área abierta apropiada.	Disponibilidad limitada. Resistencia mecánica limitada.	Hasta de 7%

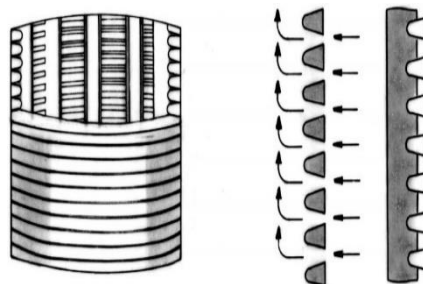
Fuente: LLANCA BLAS, Wilkin Rojas. *Comparación de tipos de rejillas [en línea]. Diseño de un sistema hidráulico de extracción de agua salobre de pozo profundo*

²² VÉLEZ OTÁLVARO, María Victoria. *Hidráulica de Aguas Subterráneas*. 3ra edición. Colombia; Universidad Nacional de Colombia, 2011. 276 p. ISBN: 958-9352-88-3.

para satisfacer la demanda de planta de tratamiento de agua para la empresa Corporación Lindley S.A. – Pucusana. Perú: 2015. 113p. [Consultado: 8 de julio de 2021]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12952/1507>

En consecuencia, se selecciona una rejilla de ranura continua en PVC con ancho de ranura de 0.25mm o más conocida como filtro de ranura continua tipo 10, debido a la mayor apertura que brinda y su diseño contribuye a que no se obstruya, se requiere de 30 metros de está rejilla eso con el fin de tener un mejor caudal y buscando aprovechar las condiciones litoestratigráficas, en la siguiente figura se muestra la rejilla continua y la circulación de agua por la misma.

Figura 7. Rejilla de ranura continua y circulación de agua.



Fuente: VÉLEZ OTÁLVARO, María Victoria. *Rejilla continua - Circulación del agua [imagen]. Hidráulica de aguas subterráneas. 3 ed. Medellín: 2011, 277 p.*

A modo de cierre, enseñan las características del filtro en ranura continua para pozo profundo en PVC a 8" diámetro nominal, filtro tipo 10 (ancho de ranura 0.010").

Tabla 7. Características filtro de ranura continua PVC 8".

Ancho de Ranura 0.010" (0,25mm)							
RDE 21							
Diámetro Nominal	Referencia	Peso	Área de Entrada	De Promedio	d2 Promedio	C	Dint. Máximo
pulg.		Kg	$Cm^2 / filt$	mm	mm	mm	mm
8	0271302005	34,405	12,85	219,08	222,68	177	198,26

Fuente: PAVCO. *Filtros para pozos profundos [en línea]. [Consultado: 9 de julio de 2021]. Disponible en: <https://pavco.com.co/download/18>*

2.4.4. Sello sanitario y sello bentónico

Debido a que la contaminación del pozo procede desde la superficie o de acuíferos superiores contaminados, se da la necesidad de realizar un sello sanitario.

Se colocará un sello sanitario en los primeros 9 metros a partir de la superficie del terreno en hormigón ciclópeo, el cuál es un núcleo impermeable de arcilla

compactada alrededor de la tubería del pozo que sirve para evitar el ingreso de las aguas superficiales por infiltración.

SLS ENERGY S.A.S manifiesta respecto a la tapa final del pozo que “Por seguridad se fabrica una tapa para el pozo la cual es del mismo diámetro que la tubería utilizada en el entubado, esta se la coloca enroscada en la tubería para evitar que pueda entrar en el pozo cualquier objeto que pueda dañar la bomba o los filtros”²³.

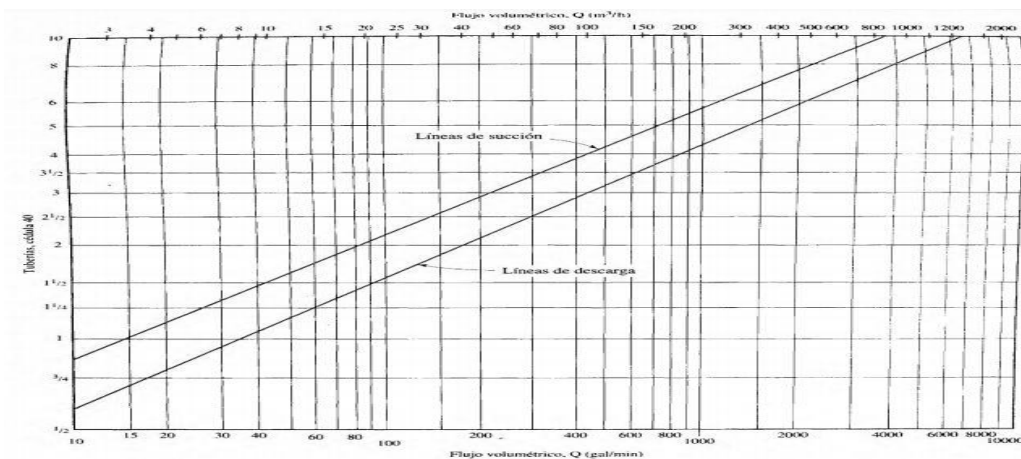
Para finalizar se utiliza un sello de bentonita en el fondo del pozo de 1 metro de espesor, luego en el tramo de 9 metros a 50 metros se utiliza el mismo sello bentónico, esto con intención de separar el engravado de la cementación e impermeabilizar el concreto de la humedad proveniente de la zona del pre-filtro.

Para construir este sello, se utilizan tabletas bentónicas compuestas de bentonita de sodio puro, el cual cuando entran en contacto con el agua se agrandan 10 a 15 veces su volumen original.

2.4.5. Selección del diámetro de la tubería de descarga

Para un flujo volumétrico de $42.2 \frac{m^3}{h}$ recomiendan una tubería de descarga de 3” (pulgadas) debido a que genera menor pérdida en acero cédula 40, esta selección se realizó con base en la siguiente figura que expone Mott.

Figura 8. Selección de la tubería de descarga.



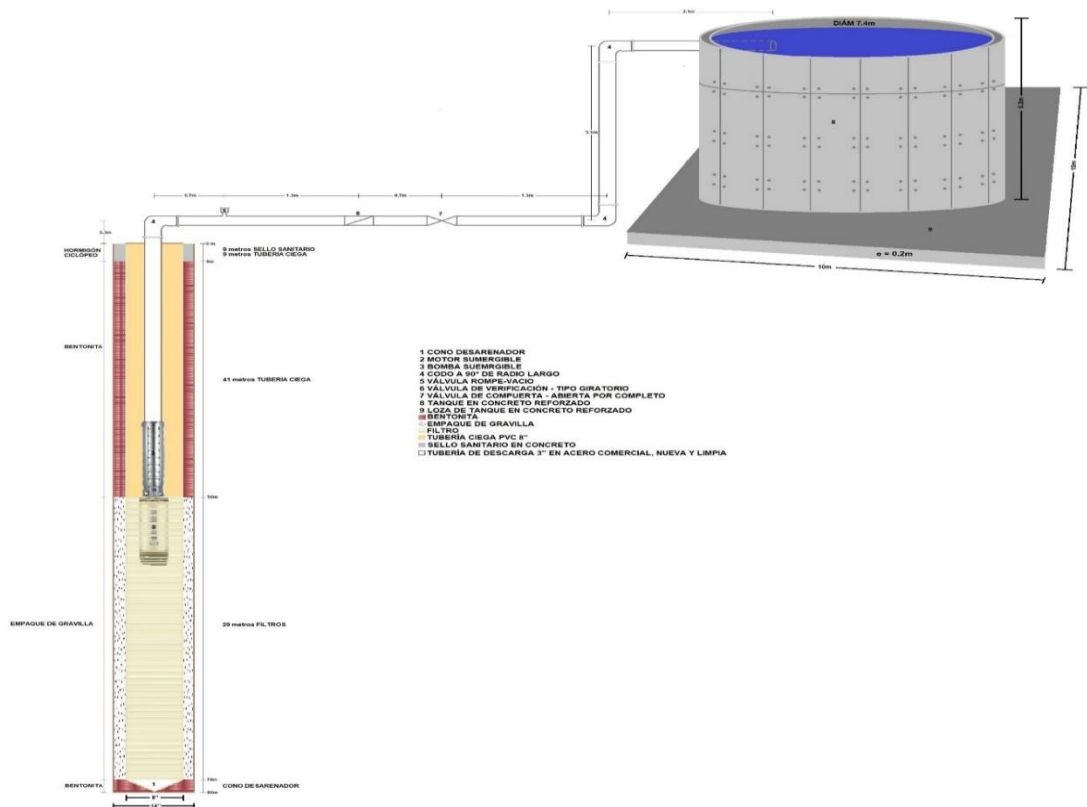
Fuente: MOTT, Robert L. Ayuda para seleccionar el tamaño de tubería [imagen]. *Mecánica de Fluidos. Sexta edición. México: Pearson educación. 2006. 163p.*

²³ SLS ENERGY S.A.S. Consultoría para realizar estudios geoeléctricos, tomografía eléctrica y de resistividades en 5 puntos para la prospección de agua subterránea en el municipio de Cota Cundinamarca [en línea]. Bogotá: 2016. 67 p. [Consultado: 9 de julio de 2021]. Disponible en: http://emsercota.gov.co/documentos/convocatorias/2018-2cvp/pozo/ESTUDIOS_GEOELECTRICOS.pdf

2.4.6. Estimación de la pérdida total de energía y la carga total sobre la bomba

Es indispensable fijar las pérdidas que generan los componentes en el sistema, debido a que es un complemento para calcular la carga total sobre la bomba y posterior a ello la potencia de esta. En consecuencia, los investigadores desarrollaron el siguiente diseño del pozo profundo, con el fin de tener claridad en las medidas y tipos de acoplamiento en los tramos de la tubería.

Figura 9. Diseño final del pozo profundo.



Fuente: Autor.

A continuación, se presenta la ecuación general de la energía y su posterior desarrollo debido a que hay pérdida y ganancia de energía, con el fin de describir, cuantificar e identificar la pérdida de energía y la carga total sobre la bomba que generan los distintos componentes que comprenden el sistema de bombeo.

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

p = Presión en un punto del sistema.

γ = Peso específico del fluido.

z = Altura en un punto del sistema.

v = Velocidad del fluido.

g = Gravedad.

h_A = Energía que se agrega al fluido.

h_R = Energía que se remueve del fluido.

h_L = Pérdidas de energía por fricción en tubería y accesorios.

Para el desarrollo de la (Ecuación 4), se tienen las siguientes particularidades que son propias del sistema.

$$p_1 = p_2 = 0$$

$$h_R = 0$$

$$v_1 = 0$$

Despejan h_A y queda:

$$h_A = (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2}{2g} + h_L \quad \text{(Ecuación 4a)}$$

Para determinar h_L es necesario predecir el tipo de fluido, utilizan la ecuación del número de Reynolds el cual establece si el flujo es laminar o turbulento.

Dónde:

$$Q = 42.2 \frac{m^3}{h} \text{ (Caudal)}$$

$$A = 4.768 \times 10^{-3} m^2 \text{ (Flujo de área de la tubería)}$$

Reemplazan en (Ecuación 5).

$$v_2 = \frac{Q}{A} = \frac{42.2 \frac{m^3}{h}}{4.768 \times 10^{-3} m^2} = 8850.67 \frac{m}{h} \left(\frac{1h}{3600s} \right) = 2.46 \frac{m}{s} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Ahora que saben la v_2 y conocen las demás variables, se procede a desarrollar la (Ecuación 6).

$$\nu = 1.02 \times 10^{-3} \frac{m^2}{s} \text{ (Viscosidad cinemática)}$$

$$D = 0.0779m \text{ (Diámetro interior de la tubería)}$$

$$N_R = \frac{v_2 D}{\nu} = \frac{2.46 \frac{m}{s} \times 0.0779m}{1.02 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 187.876 \times 10^3 \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Como el número de Reynolds es $N_R > 4000$, el flujo es turbulento.

Ahora bien, los investigadores requirieron determinar el factor de fricción del flujo turbulento ver (Ecuación 7).

Dónde:

$\epsilon = 4.6 \times 10^{-5}m$ (Rugosidad del tubo, Acero comercial)

Resuelven la (Ecuación 7).

$$f_d = \frac{0.25}{\left[\log \frac{1}{3.7(D/\epsilon)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right]^2} = 0.01949 \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Las pérdidas menores en la tubería las determinaron con ayuda del factor de fricción, para la tubería de acero comercial, nueva y limpia, tomaron como guía el siguiente factor de fricción (f_{dT}) del libro de Mecánica de Fluidos.

Tabla 8. Factor de fricción de la tubería.

Tamaño nominal de la tubería (pulg)	Factor de fricción f_t
3	0,018

Fuente: MOTT, Robert L. Factor de fricción en la zona de turbulencia completa para tubería de acero comercial, nueva y limpia. Mecánica de Fluidos. Sexta edición. México: Pearson educación. 2006. 297p.

Como especificaron, la tubería es de 3" (pulgadas) por lo que según la tabla de MOOT eligieron un $f_{dT} = 0.018$.

Por otra parte, para determinar las pérdidas en válvulas y accesorios, se apoyan en la siguiente tabla.

Tabla 9. Coeficiente de resistencia en válvulas y acoplamientos.

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D
Válvula de compuerta-abierta por completo	8
Válvula de verificación-tipo giratorio	100
Codo a 90° de radio largo	20

Fuente: MOTT, Robert L. Resistencia de válvulas y acoplamientos, expresada como longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D . Mecánica de Fluidos. Sexta edición. México: Pearson educación. 2006. 297p.

Con el objetivo de resolver h_L , que es, la pérdida total de energía por unidad de peso del fluido en movimiento, sumaron todas las pérdidas en la tubería como se muestra a continuación. Por lo que h_L será igual a:

$$h_L = h_4 + h_6 + h_7 + h_8 \quad (\text{Ecuación 8})$$

Pérdida de energía en los tres codos de 90° de radio largo:

$$h_4 = 20 \cdot f_{dR} \left(\frac{v_2^2}{2g} \right) = 0.11m \cdot 3 = 0.33m \quad (\text{Ecuación 9})$$

Pérdida de energía en la válvula de verificación tipo giratorio.

$$h_6 = 100 \cdot f_{dR} \left(\frac{v_2^2}{2g} \right) = 0.55m \quad (\text{Ecuación 9a})$$

Pérdida de energía en la válvula de compuerta, abierta por completa.

$$h_7 = 8 \cdot f_{dR} \left(\frac{v_2^2}{2g} \right) = 0.044m \quad (\text{Ecuación 9b})$$

Pérdida por fricción en la línea de descarga.

Dónde:

$L = 60.5m$ (Longitud total de la tubería)

$$h_8 = f_d \cdot \frac{L}{D} \cdot \left(\frac{v_2^2}{2g} \right) = 0.01949 \cdot \frac{60.5m}{0.0779m} \cdot \frac{\left(2.46 \frac{m}{s} \right)^2}{2 \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}} = 4.67m \quad (\text{Ecuación 10})$$

Finalmente, la pérdida total de energía del sistema es de:

$$h_L = 0.33m + 0.55m + 0.044m + 4.67m = 5.594m \quad (\text{Ecuación 8a})$$

Ahora bien, ya que tienen todos los valores, proceden a sustituirlos en la ecuación general de la energía, donde h_A es la carga total sobre la bomba.

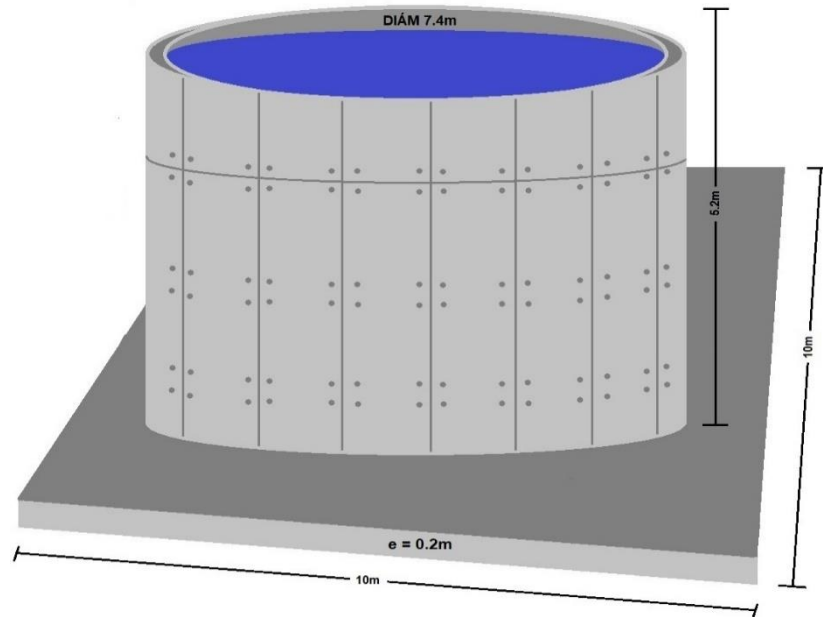
$$h_A = (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2}{2g} + h_L = 54.4 + \frac{\left(2.46 \frac{m}{s} \right)^2}{2 \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}} + 5.594 = 60.3m \quad (\text{Ecuación 4b})$$

2.5. DIMENSIONAMIENTO DEL DEPOSITO DE AGUA

El dimensionamiento del tanque lo tomaron con base a la cantidad de agua requerida por la comunidad, el cual fue de $62.882m^3$ y establecieron un volumen que posea una independencia de agua para 3 días.

El tanque será de forma cilíndrica en concreto reforzado y con las siguientes características:

Figura 10. Forma y características del depósito de agua.



Fuente: Autor.

Para dimensionar el volumen que soportará el tanque, especificaron las siguientes características de este y posterior a ello sustituyeron en la (Ecuación 11).

$r_i = 3.5m$ (Radio interno del tanque)

$h = 5m$ (Altura del agua del tanque)

Reemplazan y calculan:

$$V_{\text{Agua}} = \pi \cdot r_i^2 \cdot h = \pi \cdot (3.5m)^2 \cdot 5m = 192.42m^3 \quad (\text{Ecuación 11})$$

Ahora, desarrollaran todos los factores que intervienen en el depósito de agua para definir su peso estructural total.

El peso del agua lo definen por medio de la (Ecuación 12):

$$\rho_{\text{Agua}} = 998 \frac{Kg}{m^3} \text{ (Densidad del agua)}$$

$$P_{Agua} = V_{Agua} \cdot \rho_{Agua} = 192.42m^3 \cdot 998 \frac{Kg}{m^3} = 192035.16Kg \quad (\text{Ecuación 12})$$

El peso estructural del muro se establece por medio de la (Ecuación 14).

$$r_e = 3.7m (\text{Radio externo del tanque})$$

$$e = 0.2m (\text{Espesor del tanque y loza})$$

$$\rho_{Concreto} = 2400 \frac{Kg}{m^3} (\text{Densidad del concreto reforzado})$$

$$V_{Paredes} = 2\pi \cdot r_e \cdot h_T \cdot e = 2\pi \cdot 3.7m \cdot 5.2 \cdot 0.2 = 24.18m^3 \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$P_{Paredes} = V_{Paredes} \cdot \rho_{Concreto} = 24.18m^3 \cdot 2400 \frac{Kg}{m^3} = 58032Kg \quad (\text{Ecuación 14})$$

Para finalizar calculan el peso de la loza de fondo con la (Ecuación 16):

$$d = 10m (\text{Lado y ancho de loza})$$

$$V_{Loza} = d \cdot d \cdot e = 10m \cdot 10m \cdot 0.2m = 20m^3 \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$P_{Loza} = V_{Loza} \cdot \rho_{Concreto} = 20m^3 \cdot 2400 \frac{Kg}{m^3} = 48000Kg \quad (\text{Ecuación 16})$$

Para finalizar establecen el peso total del depósito de agua.

$$P_{Total} = P_{Agua} + P_{Paredes} + P_{Loza} = 192035.15Kg + 58032Kg + 48000Kg \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$P_{Total} = 298067.15 Kg \cdot \left(\frac{1 Ton}{1000Kg} \right) = 298.08 Toneladas \quad (\text{Ecuación 17a})$$

En conclusión, las características del tanque son:

- $V_{Agua} = 192.42m^3$
- $P_{Total} = 298.08 Toneladas$
- $r_e = 3.7m$ (Radio externo del tanque)
- $h_T = 5.2m$ (Altura total del tanque)
- $e = 0.2m$ (Espesor del tanque y de loza)
- $d = 10m$ (Lado y ancho de loza)

El tanque en mención se diseña para ser construido en concreto reforzado y con las características anteriormente dichas.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE BOMBEO

Se detalla la potencia que requiere la bomba sumergible para su selección, realizan el cálculo del NPSH para evidenciar que es viable utilizar la bomba seleccionada sin cavitación, posterior a ello se establece el punto de operación de la bomba para verificar si cumple con el caudal y la altura propuesta, finalmente calculan el consumo energético de los componentes, se especifica el consumo total diario de energía del sistema y detallan el beneficio económico producto del sistema fotovoltaico.

3.1. CÁLCULO DE LA POTENCIA QUE REQUIERE LA BOMBA

Para determinar la potencia que requiere la bomba del sistema, se calcula por medio de la (Ecuación 18).

$$P_A = h_A \gamma Q \quad (\text{Ecuación 18})$$

Dónde:

$$h_A = 60.3m \text{ (Carga total sobre la bomba)}$$

$$\gamma = 9.81 \frac{kN}{m^3} \text{ (Peso específico del agua)}$$

Resuelven:

$$P_A = 60.3m \cdot 9.81 \frac{kN}{m^3} \cdot 0.01172 \frac{m^3}{s} = 6.933KW = 9.3HP \quad (\text{Ecuación 18a})$$

3.1.1. Selección de bomba y motor

El grupo investigador estableció que la bomba deberá tener por lo menos 15HP de potencia, por consiguiente, debemos elegir una bomba y motor que se adecuen a las características dichas, para impulsar nuestro fluido hasta el depósito propuesto.

Las bombas sumergibles son muy utilizadas para la extracción de agua en pozos profundos, Mott afirma que “Las bombas sumergibles están diseñadas de modo que pueda sumergirse todo el conjunto de la bomba centrífuga, el motor impulsor y los aparatos de succión y descarga”²⁴, en la siguiente figura mostramos una bomba sumergible con su respectivo motor.

²⁴ MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos. 6ta edición. México: Pearson educación, 2006. 395 p. ISBN: 970-26-0805-8.

Figura 11. Bomba sumergible.



Fuente: PEARL. Bombas sumergibles de 6" [imagen]. [Consultado: 10 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.pdwatersystems.com/catalog/PEARL-CATALOGO-BOMBAS%20SUMERGIBLES%20DE%204-6-8-10.pdf>

Figura 12. Motor sumergible.



Fuente: PEARL. Motores sumergibles encapsulados de 6" [imagen]. [Consultado: 10 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.pdwatersystems.com/catalog/PEARL-CATALOGO-MOTORES-SUMERGIBLES.pdf>

La referencia de la bomba sumergible que más se adecua a nuestro sistema es la modelo 6PWS230G150 de la marca PEARL, debido a que requiere un motor de 15HP, es monofásica y presenta una altura máxima de 72.6 metros a un caudal de trabajo de 200GPM, está bomba es ideal para suplir la demanda que requiere el sistema y presenta las siguientes características según el fabricante²⁵.

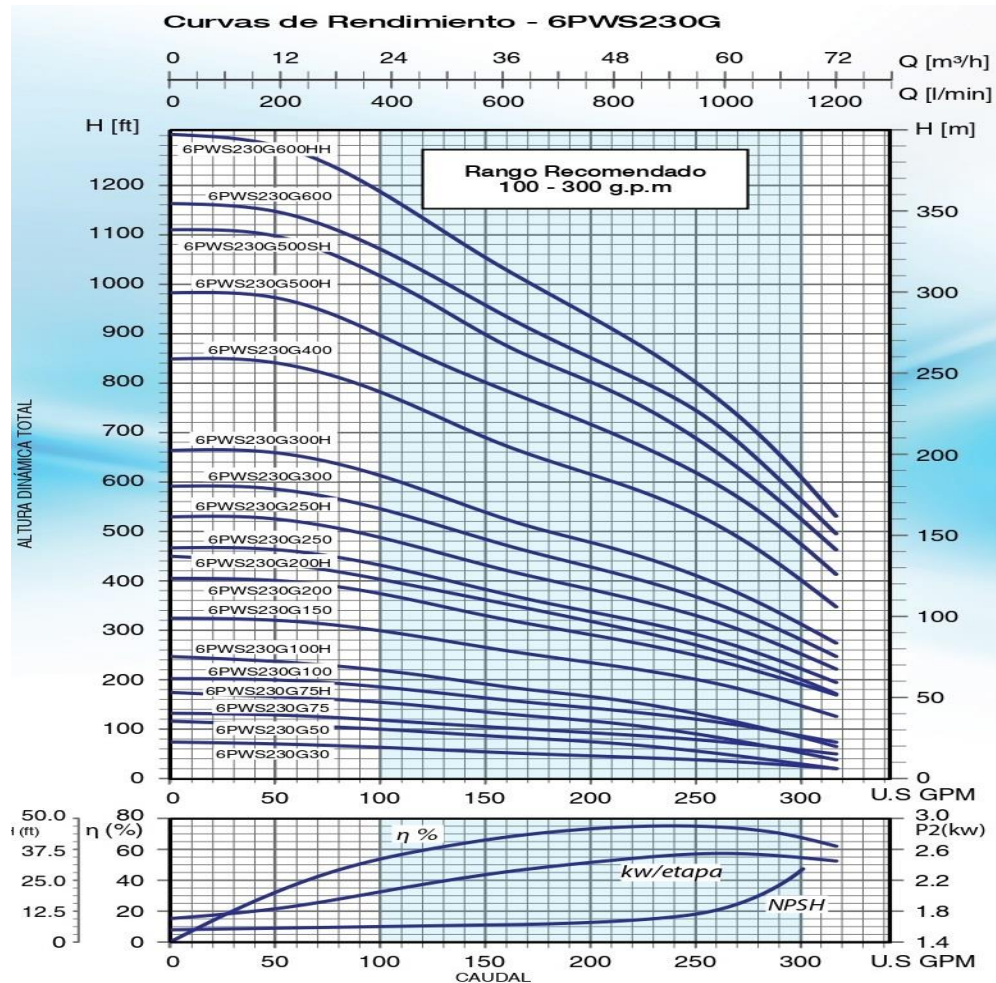
- Diseñada y construida en acero inoxidable para garantizar años de funcionamiento libre de fallas.
- Descarga en acero inoxidable para servicio pesado, con válvula check incorporada, para una larga vida útil y facilitar la instalación.
- Especificaciones de montaje de acuerdo con la norma NEMA.
- Rodamientos del eje de alta calidad, garantizan una baja fricción y una alta resistencia al desgaste.

²⁵ PEARL. Bombas Sumergibles en Acero Inoxidable 4", 6", 8" y 10" [en línea]. Miami: 2019. 6 p. [Consultado: 2 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.pdwatersystems.com/catalog/PEARL-CATALOGO-BOMBAS%20SUMERGIBLES%20DE%204-6-8-10.pdf>

- Impulsores y difusores en acero inoxidable para servicio pesado que aseguran un óptimo desempeño.
- Rejilla de acero inoxidable para restringir el paso de piedras y otros materiales extraños.

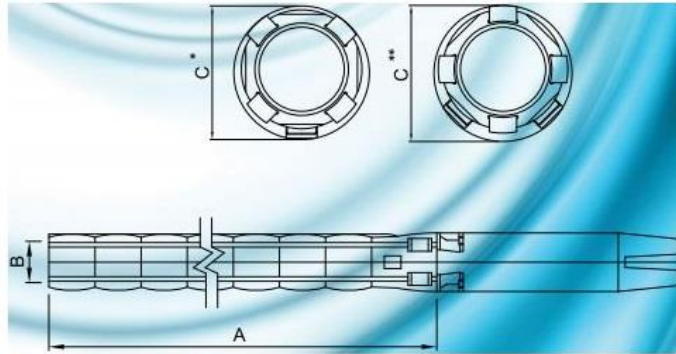
Finalizan mostrando las siguientes figuras, la curva de rendimiento y las dimensiones de la bomba sumergible en mención.

Figura 13. Curva de rendimiento bomba sumergible 6PWS230G150.



Fuente: PEARL. Curvas de rendimiento – 6PWS230G [imagen]. [Consultado: 10 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.pdwatersystems.com/catalog/PEARL-CATALOGO-BOMBAS%20SUMERGIBLES%20DE%204-6-8-10.pdf>

Figura 14. Dimensiones - 6PWS230G150



MODELO	DIMENSIONES IN / MM								PESO NETO	
	A		B	C*		C**		LBS	KG	
	IN	MM	IN	IN	MM	IN	MM			
6PWS230G150	32.87	835	NPT 3" or 4"	5.87	149	5.98	152	35.36	16	

C* : Diámetro máximo de la bomba cuando es ensamblada con un cable de alimentación.

C** : Diámetro máximo de la bomba cuando es ensamblada con dos cables de alimentación.

Fuente: PEARL. Dimensiones – 6PWS230G [imagen]. [Consultado: 10 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.pdwatersystems.com/catalog/PEARL-CATALOGO-BOMBAS%20SUMERGIBLES%20DE%204-6-8-10.pdf>

La bomba sumergible 6PWS230G150 requiere un motor de 15 HP de potencia, a continuación, detallan las características generales de un motor sumergible según el fabricante²⁶.

- 5,5-60 HP / 3PH. 220-230 Voltios / 60Hz.
- Alta eficiencia garantiza ahorro en costos operacionales
- Carcasa y eje en acero inoxidable AISI304L (opcional: AISI316L)
- Soporte superior e inferior en hierro fundido con recubrimiento de alta resistencia
- Rodamientos de empuje axial tipo Kingsbury lubricado por agua
- Protección IP68
- Deflector de arena
- Diafragma compensador de presión
- Aislamiento clase F
- Cable de alimentación removible
- Arranque directo DOL o de estrella/triángulo
- Revoluciones de funcionamiento variables por medio de variador de frecuencia (por encima de 30 Hz)
- Puede ser operado por Soft-Starter

²⁶ PEARL. Motores Sumergibles Encapsulados de 6" [en línea]. Miami: 2021. 16 p. [Consultado: 10 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.pdwatersystems.com/catalog/PEARL-CATALOGO-MOTORES-SUMERGIBLES.pdf>

requerida, $NPSH_R$, de la bomba en cada condición de capacidad de operación (flujo volumétrico) y carga total sobre la bomba²⁷.

Este proyecto lo basaron en lo que sugiere Mott, se diseñará el $NPSH$ con un margen mínimo del 10%, quedando:

$$NPSH_A > 1.1 \cdot NPSH_R \quad (\text{Ecuación 19})$$

Donde:

$$NPSH_A = h_{sp} \pm h_s - h_f - h_{vp} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Para la solución de la (Ecuación 20) es importante definir los términos que la componen, Mott²⁸ los define como:

$$p_{sp} = \text{Presión estática (absoluta) sobre el fluido.} \quad (\text{Ecuación 21})$$

$$h_{sp} = p_{sp}/\gamma, \text{ carga de presión estática (absoluta) sobre el fluido.} \quad (\text{Ecuación 22})$$

h_s = Diferencia de elevación desde el nivel de fluido en el depósito a la línea central de la entrada de succión de la bomba.

h_f = Pérdida de carga en la tubería de succión.

h_{vp} = Carga de presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo.

Por consiguiente, procedemos con el desarrollo de la (Ecuación 20).

$$p_{sp} = 102.8 \text{ KPa} + 0 = 102.8 \text{ KPa} \quad (\text{Ecuación 21a})$$

$$h_{sp} = \frac{p_{sp}}{\gamma} = 10.5m \quad (\text{Ecuación 22a})$$

$$h_s = +54.4m$$

²⁷ *Ibíd.*, p. 413.

²⁸ *Ibíd.*, p. 415.

$h_f = 0.25m$ (Esta pérdida se genera debido a la resistencia que oponen los impulsores cuando el agua ingresa a la bomba sumergible).

Para determinar el h_{vp} se basaron en la siguiente tabla.

Tabla 11. Carga de presión de vapor en (m).

Temperatura °C	Presión de vapor kPa (abs)	Peso específico $\frac{kN}{m^3}$	Carga de presión de vapor (m)
5	0,8722	9,807	0,08894

Fuente: MOTT, Robert L. *Presión de vapor y carga de presión de vapor del agua. Mecánica de Fluidos. Sexta edición. México: Pearson educación. 2006. 413p.*

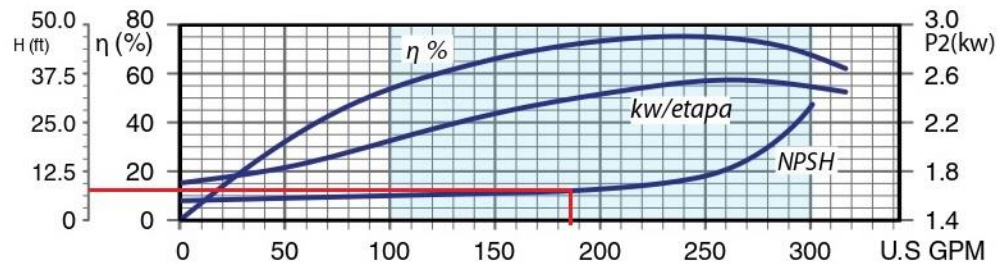
Seleccionan $h_{vp} = 0.08894m$

Remplazan los valores descritos en la (Ecuación 20), tendrían que:

$$NPSH_A = 10.5m + 54.4m - 0.25m - 0.2388m = 64.56m \quad (\text{Ecuación 23})$$

Ahora que definieron el $NPSH_A$ verificaron en los datos técnicos que proporciona el fabricante respecto a la bomba seleccionada para establecer el $NPSH_R$ y comprobar que es apropiado para el sistema.

Figura 16. $NPSH_R$ para la bomba 6PWS230G150.



Fuente: PEARL. *Curvas de rendimiento – 6PWS230G [imagen].* [Consultado: 12 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.pdwatersystems.com/catalog/PEARL-CATALOGO-BOMBAS%20SUMERGIBLES%20DE%204-6-8-10.pdf>

Como se evidencia en la gráfica proporcionada por el fabricante, el $NPSH_R = 7.81ft = 2.38m$, por lo tanto:

$$NPSH_A > 1.1 \cdot NPSH_R \quad (\text{Ecuación 19a})$$

$$64.56m > 2.618m \quad (\text{Ecuación 19b})$$

Esto indica que la bomba sumergible es óptima para operar en el sistema sin cavitación.

3.1.3. Punto de operación de la bomba

El punto de operación de la bomba se establece como el caudal que enviará cuando se instale en el sistema, para ello establecieron la curva del sistema con la curva de la bomba y donde estas se intercepten determinará cuánto flujo se envía en realidad hacia el sistema, Mott sostiene que “Una vez que se activa, la bomba buscará en forma automática este punto de operación. Así, cuando opera en este punto, la bomba envía un flujo volumétrico Q_1 contra una carga total h_1 ”²⁹.

Para determinar la curva del sistema buscaron encontrar una relación h_A vs Q , donde expresaron una función cuadrática de la forma $aQ^2 + bQ + c$, donde por lo general bQ tiende a 0(cero), tomamos la (Ecuación 1a), despejaron para obtener la forma anteriormente dicha y queda:

$$h_A = 54.4m + \left(1 + 20f_{dT} + 100f_{dT} + 8f_{dT} + f_d \cdot \frac{L}{D}\right) \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad (\text{Ecuación 24})$$

Utilizaron la siguiente (Ecuación 25) :

$$v_2^2 = \frac{Q^2}{A^2} \quad (\text{Ecuación 25})$$

Remplazaron la (Ecuación 25) en la (Ecuación 24) .

$$h_A = 54.4m + \left(1 + 20 \cdot f_{dT} + 100 \cdot f_{dT} + 8 \cdot f_{dT} + f_d \cdot \frac{L}{D}\right) \cdot \frac{Q^2}{2 \cdot A^2 \cdot g} \quad (\text{Ecuación 26})$$

Ahora que obtuvieron la ecuación del punto de operación del sistema, proceden a graficar los datos, para tener una percepción gráfica del mismo, de manera análoga graficaron la curva de la bomba seleccionada, con los datos técnicos que proporciona el fabricante.

²⁹ *Ibíd.*, p. 411.

Tabla 12. Datos de la curva del sistema y curva de la bomba.

Punto de operación de la bomba		
Parámetros		
Q	42,2	m^3/h
$Z_2 - Z_1$	54,4	m
g	9,81	m/s^2
A	4,768E-03	m^2

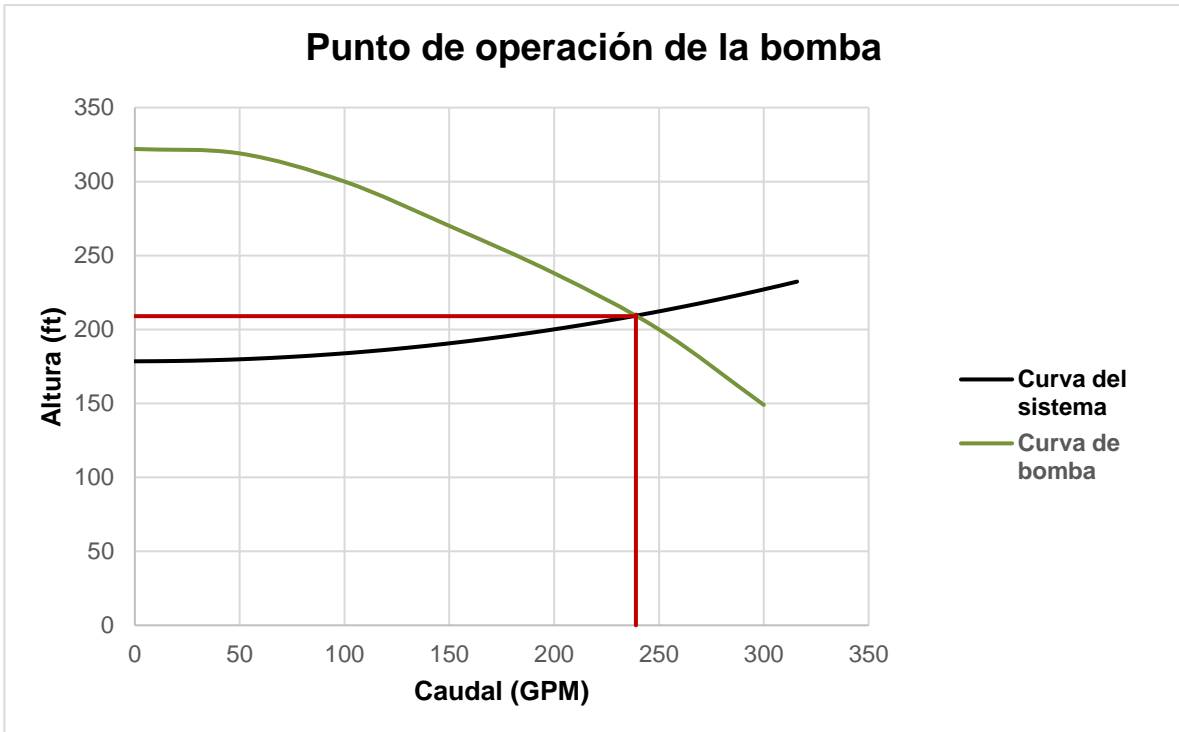
Curva del sistema			
$Q \text{ m}^3/h$	$Q \text{ (GPM)}$	$h_A \text{ (m)}$	$h_A \text{ (ft)}$
0	0	54,400	178,477696
4,22	19	54,457	178,664074
8,44	37	54,627	179,223208
12,66	56	54,911	180,155097
16,88	74	55,309	181,459742
21,10	93	55,820	183,137143
25,32	111	56,445	185,1873
29,54	130	57,184	187,610212
33,76	149	58,036	190,40588
37,98	167	59,001	193,574304
42,20	186	60,081	197,115484
46,42	204	61,274	201,02942
50,64	223	62,580	205,316111
54,86	242	64,001	209,975558
59,08	260	65,534	215,007761
63,30	279	67,182	220,412719
67,52	297	68,943	226,190434
71,74	316	70,818	232,340904

Curva de la bomba	
$Q \text{ (GPM)}$	$h_A \text{ (ft)}$
0	322
50	319
100	300
150	270
200	238
250	200
300	149

Fuente: Autor.

Por consiguiente, graficaron la curva del sistema y la curva de la bomba, con los datos anteriormente expuestos.

Figura 17. Punto de operación de la bomba.



Fuente: Autor.

En conclusión, establecieron de la gráfica del punto de operación de la bomba que la bomba sumergible seleccionada trabajaría a $239GPM = 65.19 \frac{m^3}{h}$, lo que quiere decir que es suficientemente viable en cuanto al caudal para el sistema.

Del mismo modo, la altura que presentaría la bomba en las condiciones dadas es de $209ft = 63.7m$, por lo que es adecuadamente factible utilizar esta bomba.

3.2. CONSUMO ENERGÉTICO DEL SISTEMA DE BOMBEO

EL grupo investigador especifica los componentes eléctricos que participan en el sistema, para así estimar su consumo energético diario. En la siguiente tabla los detallan.

Tabla 13. Consumo energético diario en (W) del sistema de bombeo.

Elemento	Potencia (W)	Consumo diario (h)
Electronivel Modelo EN-3	3	24
PUMP MONITOR MONOFÁSICO MODELO PM23	4	4,5
Bomba sumergible PEARL	11185,5	4,5
Consumo total diario (W)		50424,75

Fuente: Autor.

Como se refleja, el consumo energético diario del sistema de bombeo es de 50424.75 W.

Es de vital importancia conocer el beneficio en dinero que está ahorrando la zona rural de Chaguaní por el consumo de luz, para ello según enel que es una empresa multinacional del sector energético y un operador integrado líder en los mercados mundiales de electricidad y gas, establece en la tarifa de energía eléctrica³⁰, un valor máximo para la industria de \$652,7232 COP por kWh.

Multiplicamos el consumo energético diario del sistema en kW por 30 días, por 12 meses y por el valor de kWh para así tener el ahorro de dinero anual y se tiene que la zona rural de Chaguaní Cundinamarca se beneficia \$11'847'709.35 COP al año.

³⁰ ENEL. Tarifas de energía eléctrica [sitio web]. Colombia; [Consultado: 31 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/espa%C3%B1ol/personas/1-17-1/2020/Tarifario-enero-2020.pdf>

4. DISEÑO DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA EL SISTEMA DE BOMBEO

El diseño del sistema de energía solar fotovoltaica lo realizan con base al funcionamiento autónomo del sistema de bombeo, debido a que hay sitios de difícil acceso de energía eléctrica convencional, por lo que es conveniente proponer estos recursos para su operación, debido a que cada vez son más competitivos, en especial si se toma en consideración que permiten promover un desarrollo más sostenible en el planeta.

Para este fin, se procede a seleccionar y especificar los componentes que requiere el sistema solar fotovoltaico para suplir el consumo total de energía del sistema, garantizando la protección, arranque y accionamiento de todo el sistema.

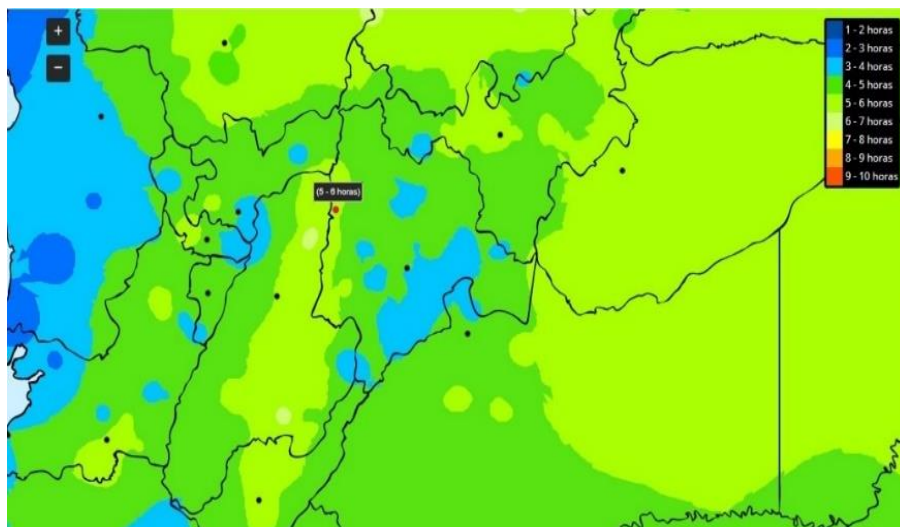
4.1. BRILLO SOLAR DIARIO EN CHAGUANÍ – CUNDINAMARCA

Se estableció como objeto de estudio la zona rural de Chaguaní específicamente en la siguiente coordenada $4^{\circ}55'39.20''N$, $74^{\circ}36'7.70''W$, este municipio pertenece al departamento de Cundinamarca y posee una temperatura de $23.2^{\circ}C$ promedio.

Para nuestro estudio es importante definir el brillo solar diario que posee esta zona, debido a que es necesario para el dimensionamiento de sistemas solares, Chaguaní posee una distribución del brillo Solar Medio Diario (horas de sol al día) de 5 horas.

A continuación, detallan la variable anteriormente dicha.

Figura 18. Brillo solar diario.



Fuente: ATLAS. Distribución del Brillo Solar Medio Diario (Horas de Sol al día) [imagen]. [Consultado: 14 de julio de 2021]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

4.2. RENDIMIENTO GLOBAL DE LA INSTALACIÓN

La generación de energía se ve afectada por el rendimiento de todos los componentes que intervienen en sistema fotovoltaico. Por tal motivo para el dimensionamiento se debe tener presente las pérdidas que estos generan. Si se diseña para el consumo justo de energía, la energía que entregará el sistema será menor a la calculada y no podremos abastecer el consumo energético mínimo que requiere el sistema de bombeo.

Por tal motivo, debemos determinar el rendimiento global de la instalación R , que es:

$$R = (1 - k_b - k_c - k_v) \cdot \left(1 - k_a \cdot \frac{N}{p_d}\right) \quad (\text{Ecuación 27})$$

Donde la sección de BIRTLH³¹ los define como:

k_b = Coeficiente de pérdidas por rendimiento de las baterías.

- 0.05 para sistemas que no demanden descargas intensas.
- 0.1 en el caso contrario. Demanden grandes descargas.

k_c = Coeficiente de pérdidas por rendimiento del inversor.

- 0.05 para inversores con onda sinusoidal pura.
- 0.1 para inversores en otras condiciones de trabajo.
- 0.4 Inversores de onda cuadrada.

k_v = Coeficiente de pérdidas varias.

Se consideran pérdidas como efecto joule, rendimiento global de la red, etc.

- 0.05 a 0.15 (valores de referencia).

k_a = Coeficiente de pérdidas por autodescarga diaria de las baterías.

- 0.002 para baterías de Níquel-Cadmio.
- 0.005 para baterías estacionares de Plomo-Ácido.
- 0.012 para baterías en constante autodescarga. (baterías de automóviles).

N = Número de días de autonomía de la instalación.

p_d = Profundidad de descarga de las baterías.

³¹ BIRTLH. Rendimiento global y Energía requerida [sitio web]. España; [Consultado: 15 de julio de 2021]. Disponible en: https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/ISF/ISF06/es_IEA_ISF06_Contenidos/website_12_rendimiento_global_y_energia_requerida.html

- 50% en las baterías de vasos y 80% el resto.

Para el desarrollo de la misma, se establecen las siguientes particularidades en sus coeficientes.

El sistema no demandará descargas intensas, su inversor será de onda pura, el valor de pérdidas varias será de 0.1, sus baterías serán estacionarios de Plomo-Ácido, 3 días de autonomía y 60% de profundidad de descarga de las baterías.

Resolviendo quedaría:

$$R = (1 - 0.05 - 0.05 - 0.1) \cdot \left(1 - 0.005 \cdot \frac{3}{0.6}\right) = 0.78 \quad (\text{Ecuación 27a})$$

Ahora, calculan por medio de la (Ecuación 28) el consumo energético real que debe entrar a los bornes del subsistema acumulador.

$E_t = 50424.75 \text{ Wh}$ (Consumo energético diario total del sistema), definido en la sección 3.2.

$$E = \frac{E_T}{R} = \frac{50424.75 \text{ Wh}}{0.78} = 64647.11 \text{ Wh} \quad (\text{Ecuación 28})$$

4.3.DIMENSIONAMIENTO DE PANELES FOTOVOLTAICOS

La oferta energética real es la que se origina en los paneles fotovoltaicos y es medida en los bornes de las baterías, pero entre la batería y los paneles debe haber un controlador de carga, por lo cual tiene como fin enlazar correctamente entre si los paneles, la batería y la carga (sistema de bombeo).

Por tal motivo la oferta energética real debido a las pérdidas del controlador de carga tendrá un rendimiento del 90%, el cuál es el suministro de energía que deberán proveer los paneles en el día y se plasma en la siguiente (Ecuación 29).

$$E_p = \frac{E}{0.9} = \frac{64647.11 \text{ Wh}}{0.9} = 71830.12 \text{ Wh} \quad (\text{Ecuación 29})$$

Para la selección de los paneles el grupo investigador realizó las siguientes comparaciones basándose en la potencia del panel, eficiencia del módulo, dimensiones, voltaje de trabajo, el cual para instalaciones de gran consumo energético recomiendan 24V y de célula monocristalina debido a su alto rendimiento, para tal fin, se exhiben las características de 3 tipos de paneles solares.

Tabla 14. Comparación de paneles solares.

	Potencia	Eficiencia	Dimensiones	Voltaje	Tipo de Célula	Cantidad de paneles
Opción panel 1	340W	17,50%	1956 x 992 x 40 mm	24V	Policristalino	43
Opción panel 2	370W	19,07%	1956 x 992 x 40 mm	24V	Monocristalino	39
Opción panel 3	380W	19.6%	1960 x 991 x 40 mm	24V	Monocristalino	38

Fuente: Autor.

Seleccionan el panel de la opción 3 con las características que allí se describen, debido a que se requieren menos paneles, mejor potencia, eficiencia, voltaje y tipo de célula.

El panel en mención también es adecuado por las características que presenta y el fabricante sostiene que “El Panel Solar 380W 24V Monocristalino es un ejemplo de avance en cuanto al rendimiento de las placas solares y en la relación precio-potencia. Entrega un gran rendimiento sea cual sea el tipo de luminosidad, lo que le hace alcanzar una eficiencia del módulo del 19% y todo esto respetando un precio muy asequible”³².

En adelante, estimamos el número de paneles necesarios (N_p) para el sistema, basándose en el panel solar seleccionado que presenta módulos solares monocristalinos con 380W de potencia y un voltaje de trabajo a 24V.

Entonces:

E_p = Suministro real de energía que deben producir los paneles.

P_p = Potencia del panel seleccionado.

HSP = Horas pico solar.

$$N_p = \frac{E_p}{P_p \cdot HSP} = \frac{71830.12Wh}{380W \cdot 5h} = 37.81 \approx 38 \quad (\text{Ecuación 30})$$

Como resultado, para garantizar la energía del sistema se requieren de 38 paneles monocristalinos con 380W de potencia a 24V, los paneles se conectarán por parejas

³² AUTOSOLAR. Características del Panel Solar 380W 24V Monocristalino PERC JA Solar [sitio web]. Colombia; [Consulado: 16 de julio de 2021]. Disponible en: <https://autosolar.co/paneles-solares-24v/panel-solar-380w-24v-monocristalino-perc-ja-solar>

en serie y a su vez todas las parejas conectadas entre sí en paralelo. Esto con el fin de obtener un arreglo que genere 48V.

4.4. CAPACIDAD DE BATERÍAS

Las baterías es uno de los componentes más importantes del sistema fotovoltaico, debido a que almacenan la electricidad generada por los módulos y la distribuye al sistema de bombeo cuando se requiera, por ello se diseña la instalación con una autonomía de 3 días, en otras palabras, las baterías son las encargadas de asegurar la energía necesaria por 3 días con baja o sin irradiación solar.

Para ilustrar esto se determina la capacidad de las baterías por medio de la (Ecuación 31).

$$C = \frac{E \cdot N}{V \cdot p_d} = \frac{64647.11 \text{ Wh} \cdot 3}{48V \cdot 0.6} = 6734.07Ah \quad (\text{Ecuación 31})$$

Ya que se establece la capacidad de corriente que debe tener el banco de baterías, realizan la comparación de las mismas para la selección de estas.

Tabla 15. Comparación de baterías.

	Voltaje de la batería	Amperios-Hora de la Batería	Cantidad de baterías	Tipo de batería
Opción batería 1	48V	3420Ah	2	Estacionaria Plomo-Ácido VLA
Opción batería 2	48V	3750Ah	2	Estacionaria Plomo-Ácido VLA
Opción batería 3	48V	4090Ah	2	Estacionaria Plomo-Ácido VLA

Fuente: Autor.

Para ello selecciona la batería de la opción 1 el cuál son baterías estacionarias de Plomo Ácido, estas baterías en mención se ajustan al sistema fotovoltaico con capacidad de 3420Ah a 48V y se conectaran en paralelo entre ellas, para que se mantenga el voltaje constante y se suma la capacidad de amperios-hora. A continuación, muestran la batería seleccionada.

4.5. DIMENSIONAMIENTO CONTROLADOR DE CARGA

En la mayoría de los sistemas fotovoltaicos con baterías es necesario un controlador de carga, Abella manifiesta al respecto que “La misión primordial de un regulador de carga en un sistema fotovoltaico autónomo con baterías, es realizar un proceso

óptimo de carga de la batería, permitiendo la carga completa, pero evitando la sobrecarga y la sobredescarga”³³.

El controlador de carga maximiza la energía suministrada por los paneles fotovoltaicos, asegurando la protección de estos y una larga vida útil a las baterías debido al uso óptimo de estas.

Para la elección del regulador, utilizan reguladores con tecnología MPPT, Caicedo nos dice respecto sobre estos reguladores que “Está diseñado para regular el voltaje generado por los paneles ya que puede elevarlo o disminuirlo, logrando esto como su nombre lo indica, al seguir los valores óptimos de voltaje y corriente que proporcionan la potencia máxima de salida, es decir la que es entregada a las baterías”³⁴.

Para el cálculo de estos, lo realizan con base en la (Ecuación 32).

Donde:

I_{SC} = Corriente en cortocircuito.

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

% Seguridad equivalente a 20%.

$$I_{MAX} = I_{SC} \cdot N_{paralelo} \cdot \%Seguridad = 10.05A \cdot 19 \cdot 1.2 = 229.14A \quad (\text{Ecuación 32})$$

Por lo tanto, adoptaremos 2 reguladores de 85A y uno de 60A todos en paralelo y con tecnología de control MPPT.

Para finalizar exponen las características técnicas de los controladores de carga seleccionados.

³³ ABELLA, Miguel Alonso. Sistemas fotovoltaicos [en línea]. Master en energías renovables y mercado energético. Madrid: CIEMAT, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Departamento de Energías Renovables. 2005. 28 p. [Consultado: 16 de julio de 2021]. Disponible en: <https://static.eoi.es/savia/documents/componente45335.pdf>

³⁴ CAICEDO GÓMEZ, Santiago. Estudio técnico de un sistema fotovoltaico para la generación de energía eléctrica en la Universidad Piloto de Colombia como caso de estudio [en línea]. Tesis Ingeniero Mecatrónico. Colombia: Universidad Piloto de Colombia. Facultad de ingeniería. 2019. 41 p. [Consultado: 16 de julio de 2021]. Disponible en: <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/5497>

Tabla 16. Características de los controladores de carga.

Controlador de carga SmartSolar	MPPT 250/60	MPPT 250/85
Tensión de la batería	Ajuste automático a12, 24 ó 48V (Se precisa una herramienta de software para ajustar el sistema en 36V)	
Corriente de carga nominal	60A	85A
Potencia FV máxima, 48V 1 a,b)	3440W	4900W
Máxima corriente de corto circuito FC 2)	35A (máx. 30A x con. MC4)	70A (max 30A x MC4 con.)
Tensión máxima del circuito abierto FV	250V máximo absoluto en las condiciones más frías 245V en arranque y funcionando al máximo	
Eficacia Máxima	99%	
Autoconsumo	Menos de 35mA a 12V / 20mA a 48V	
Tensión de carga de "absorción"	Valores predeterminados: 14,4 / 28,8 / 43,2 / 57,6V (Regulable con: selector giratorio, pantalla, VE.Direct o Bluetooth)	
Tensión de carga de "Flotación"	Valores predeterminados: 13,8 / 27,6 / 41,4 / 55,2V (Regulable con: selector giratorio, pantalla, VE.Direct o Bluetooth)	
Algoritmo de carga	adaptativo multifase	
Compensación de temperatura	-16 mV / -32 mV / -68 mV / °C	
Protección	Polaridad inversa de la batería (fusible, no accesible por el usuario) Polaridad inversa/Cortocircuito de salida/Sobrettemperatura	
Temperatura de trabajo	-30 a +60°C (potencia nominal completa hasta los 40°C)	
Humedad	95%, sin condensación	
Puerto de comunicación de datos	VE.Direct o Bluetooth	
Interruptor on/of remoto	Sí (conector bifásico)	
Relé programable	DPST Capacidad nominal CA 240 VAC / 4A Capacidad nominal CC 4 A hasta 35VCC, 1 A hasta 60 VCC	
Funcionamiento en paralelo	Sí (no sincronizado)	
Carcasa		
Color	Azul (RAL 5012)	
Terminales FV 3)	35mm ² / AWG2 (modelos Tr), Dos pares de conectores MC4 (modelos MC4 de 250/60 y 250/70) Tres pares de conectores MC4 (modelos MC4 de 250/85 y 250/100)	
Bornes de batería	35mm ² / AWG2 (modelos Tr),	
Grado de protección	IP43 (componentes electrónicos), IP22 (área de conexión)	
Peso	3 kg	4,5 kg
Dimensiones (al x an x p) en mm	Modelos Tr: 185 x 250 x 95 mm Modelos MC4: 215x250x95 mm	Modelos Tr: 216 x 295 x 103 mm Modelos MC4: 246x295x103 mm

Fuente: AUTOSOLAR. Controladores de carga SmartSolar 250V y 99% de eficiencia MPPT 250/60, 250/70, 250/85 & 250/100 [en línea]. [Consultado: 16 de julio de 2021]. Disponible en: <https://autosolar.co/pdf/Victron-MPPT-Smart-250-60-a-100.pdf>

4.6. DIMENSIONAMIENTO DEL INVERSOR

Finalmente se calcula el inversor del sistema fotovoltaico, el cual es el encargado de transformar la corriente continua que proviene del generador fotovoltaico en corriente alterna, logrando de esta forma repartir la energía en nuestro sistema de bombeo.

Para ello suman la potencia de todos los dispositivos que conforman el sistema y se agrega como mínimo un factor de seguridad del 20%.

$$P_i = 11192.5W \cdot 1.2 = 13431W \quad (\text{Ecuación 33})$$

Se establece que la potencia requerida por el inversor es de 13431W, en consecuencia, se seleccionan dos inversores con una potencia de 8KW y 6KW que suplen la potencia mínima del sistema, estos inversores se destacan por la baja frecuencia a 120/240 VCA, su salida es de fase dividida, el voltaje de la batería debe ser de 48V y es especialmente utilizado para sistemas fotovoltaicos autónomos.

Las características técnicas de los inversores seleccionados son las que muestran a continuación:

Tabla 17. Ficha técnica de los inversores.

Datasheet	SPF 4000T DVM	SPF 5000T DVM	SPF 6000T DVM	SPF 8000T DVM	SPF 10000T DVM	SPF 12000T DVM
Battery Voltage	48VDC					
Battery Type	Lithium/Lead-acid					
INVERTER OUTPUT						
Rated Power	4KW	5KW	6KW	8KW	10KW	12KW
Surge Rating	12KW	15KW	18KW	24KW	30KW	36KW
Waveform	Pure sine wave/ same as input (bypass mode)					
Nominal Output Voltage RMS	104-110-115-120/208-220-230-240VAC(optional)					
Output Frequency	50Hz/60Hz +/-0.3 Hz					
Inverter Efficiency(Peak)	>85%					
Transfer Time	10ms(max)					
SOLAR CHARGER						
Maximum PV Charge Current	80A			120A		
Maximum PV Array Power	5000W			7000W		
Number of independent MPP trackers/ strings per MPP tracker	1/1			2/1		
MPPT Range @ Operating Voltage(VDC)	60~145VDC			60~145VDC		
Maximum PV Array Open Circuit Voltage	150VDC			150VDC		
Maximum Efficiency	>98%			>98%		
AC INPUT						
Voltage	240VAC					
Selectable Voltage Range	184~272VAC(UPS);154~272VAC(APL)					
Frequency Range	50Hz/60Hz (Auto sensing)					
Max. Charging Current	40A	50A	60A	70A	80A	100A
MECHANICAL SPECIFICATIONS						
Protection Degree	IP20					
Dimensions (W/H/D)	360/540/218mm	360/540/218mm	360/540/218mm	380/650/225mm	380/650/225mm	380/650/225mm
Weight	42kg	47kg	52kg	64kg	66kg	75kg
OPERATING ENVIRONMENT						
Operation Temperature Range	0°C to 45°C					

Fuente: AUTOSOLAR. Off Inverter SPF 4000 - 12000T DVM [en línea]. [Consultado: 16 de julio de 2021]. Disponible en: <https://autosolar.co/pdf/3004263-SPF-4000T-12000-DVM.pdf>

4.7.DIMENSIONAMIENTO DEL CABLEADO

Utilizan en toda la instalación fotovoltaica cable TOPSOLAR H1Z2Z2-K de cobre, unipolares, con aislamiento en PVC, debido a que es un cable solar diseñado para funcionar en todo tipo de instalaciones fotovoltaicas. Para el dimensionamiento del cableado parten de la tensión máxima admisible en cada circuito, por lo que, realizan el dimensionamiento respectivo para cada sección que compone la instalación fotovoltaica.

Para instalaciones autónomas BIRTHLH sugiere la siguiente tabla donde expone cada sección del circuito y su respectiva caída de tensión.

Tabla 18. *Caída de tensión en instalaciones autónomas.*

Circuito	Caída de Tensión
Panel-regulador	1,5%
Regulador-batería	0,5%
Batería-inversor	1,0%
Circuito continua	1,5%
Circuito alterna	1,5%

Fuente: BIRTHLH. *Caídas de tensión [en línea]. [Consultado: 17 de julio de 2021]. Disponible en: https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/ISF/ISF06/es_IEA_ISF06_Contentidos/webseite_26_dimensionado_de_la_seccion_del_cableado_y_de_los_dispositivos_de_proteccion.html*

Asimismo, requieren de la (Ecuación 34) para determinar la sección del cable en mm^2 en función de la intensidad válida para cobre a 20°C.

Donde:

S = Sección del cable en mm^2 .

L = Longitud del cable en metros (m).

I = Intensidad de corriente que circula por el tramo, en amperios (A).

γ = Conductividad del cobre.

ΔV = Caída de tensión admisible en voltios.

$$S = \frac{2 \cdot L \cdot I}{\gamma \cdot \Delta V} \quad \text{(Ecuación 34)}$$

Además de ello, para el dimensionamiento del cableado, la intensidad de corriente que circula por cada tramo de la instalación no debe superar las intensidades máximas que exige la norma ITC-BT-19 que es válida para instalaciones interiores

o receptoras y la ITC-BT-07 válida para redes subterráneas para distribución en baja tensión.

Por lo que es conveniente expresar que la sección del cable que determine la (Ecuación 34) si no soporta la intensidad que circula en la instalación, se opta a seleccionar una sección con relación a la norma, que supla la corriente que requiere el tramo.


En las siguientes dos tablas detallan las intensidades máximas admisibles según la sección del cable para la norma ITC-BT-19 e ITC-BT-07.

Tabla 19. Intensidades máximas admisibles en instalaciones interiores o receptoras.

Intensidades admisibles (A) al aire 40°C. Nº de conductores con carga y naturaleza del aislamiento		
B	Conductores aislados en tubos en montaje superficial o empotrados en obra	2x PVC
Cobre	mm²	(A)
	50	125
	150	260
	185	297

Fuente: Universidad D Córdoba. Intensidades admisibles (A) al aire 40°C. Nº de conductores con carga y naturaleza del aislamiento [en línea]. [Consultado: 30 de agosto de 2021]. Disponible en: http://www.uco.es/electrotecnia-etsiam/reglamentos/Guia_Tecnica_REBT/guia_bt_19_sep03R1.pdf

Tabla 20. Intensidades máximas admisibles en redes subterráneas para distribución en baja tensión.

SECCIÓN NOMINAL mm ²	Terna de cables unipolares (1)(2)
	
	TIPO DE AISLAMIENTO
	PVC
25	140
35	170
50	180 (Tripolar)

Fuente: ITC-BT-07. Intensidad máxima admisible, en amperios, para cables con conductores de cobre en instalación enterrada (servicio permanente). [en línea]. [Consultado: 30 de agosto de 2021]. Disponible en:

http://roble.pntic.mec.es/jcat0021/NUEVO_REBT/ARCHIVOS/INDICE%20DE%20LAS%20INSTRUCCIONES%20TECNICAS%20COMPLEMENTARIAS_archivos/ITC-BT-07.htm

4.7.1. Calibre de cableado Panel - Controlador de carga

La salida máxima del panel solar seleccionado es de $V_{mp} = 40.03V$, calculan la caída de tensión admisible como se muestra.

$$\Delta V = 40.03V * 0.015 = 0.6V \quad (\text{Ecuación 35})$$

Ahora, sustituyen y queda:

$$S = \frac{2 \cdot 6m \cdot (10.05A \cdot 7)}{56 \frac{m}{mm^2} \cdot 0.6V} = 25.12mm^2 \quad (\text{Ecuación 34a})$$

$$S = \frac{2 \cdot 6m \cdot (10.05A \cdot 5)}{56 \frac{m}{mm^2} \cdot 0.6V} = 14.96mm^2 \quad (\text{Ecuación 34b})$$

Eligen, por tanto, una sección comercial de $35mm^2$ en los dos ramales de 7 paneles serie-paralelo.

Para el ramal de 5 paneles serie-paralelo, eligen, una sección comercial de $25mm^2$.

Establecen que en este tramo de la instalación los cables van enterrados, por lo que deben utilizar la norma ITC-BT-07 apta para líneas subterráneas de baja tensión.

Consideran apropiado determinar la máxima intensidad admisible del cable conductor de la línea, que la denominan I_{adm} , que es la intensidad máxima admisible de las secciones elegidas, según la norma ITC-BT-07 son:

Para las secciones de $35mm^2$ y $25mm^2$, se tiene 170A y 140A respectivamente, esto quiere decir que se cumple con la intensidad máxima admisible.

4.7.2. Calibre de cableado Controlador de carga – Baterías

Para establecer el cableado en este tramo de la instalación tienen presente que la longitud será de 4m y la caída de tensión a 0.5%, calculan la caída de tensión.

$$\Delta V = 40.03V * 0.005 = 0.2V \quad (\text{Ecuación 35a})$$

Sustituyen:

$$S = \frac{2 \cdot 4m \cdot (19 \cdot 10.05A)}{56 \frac{m}{mm^2} \cdot 0.2V} = 136.39mm^2 \quad (\text{Ecuación 34c})$$

Como consecuencia, seleccionan una sección comercial de $150mm^2$.

Establecen que los cables se ponen en conductores aislados en tubos en montaje superficial o empotrados en obra denominados según la norma ITC-BT-19, tipo B y 2xPVC, se tiene una máxima intensidad admisible de 260A, lo cual cumple con lo exigido.

4.7.3. Calibre de cableado Baterías – Inversor

Para el cálculo del calibre de este tramo de la instalación, tienen presente, que se sobredimensiona la potencia prevista para tener en cuenta los picos de arranque de los motores de la instalación, proceden a hallar la corriente que circula entre los mismos, como se muestra a continuación:

$$I = \frac{P_T}{V} = \frac{14000W}{48V} = 291.66A \quad (\text{Ecuación 36})$$

Definen la caída de tensión del mismo.

$$\Delta V = 48V \cdot 0.001 = 0.48V$$

(Ecuación 35b)

Para un tramo de 3m de longitud de cable, sustituyen y calculan.

$$S = \frac{2 \cdot 2m \cdot 291.66A}{56 \frac{m}{mm^2} \cdot 0.48V} = 43.4mm^2 \quad (\text{Ecuación 34d})$$

Seleccionan una sección comercial de $50mm^2$, es claro que esta sección no cumple con el criterio de la intensidad máxima, debido a que la corriente que circula es mucho mayor a la que puede soportar, por ende, hacen uso de la norma ITC-BT-19, tipo B y 2xPVC, buscan una sección de cable que satisfaga la corriente que circula por este tramo de la instalación. En concordancia, seleccionan una sección comercial de $240mm^2$ que tiene una máxima intensidad admisible de 350A y cumple con lo exigido.

4.7.4. Calibre de cableado Inversor – Motor sumergible

Para el cálculo del calibre de cableado para el tramo final de la instalación se rige por las variables que describen a continuación:

$L = 59m$, longitud que recorre el cable desde la salida del regulador al motor de la bomba sumergible.

$$I = \frac{14000W}{230V} = 60.87A \quad (\text{Ecuación 37})$$

Caída de tensión máxima permitida en este tramo.

$$\Delta V = 230V \cdot 0.015 = 3.45V \quad (\text{Ecuación 35c})$$

Calculando:

$$S = \frac{2 \cdot 59m \cdot 60.87A}{56 \frac{m}{mm^2} \cdot 3.45V} = 37.18mm^2 \quad (\text{Ecuación 34e})$$

Por lo cual, seleccionan una sección comercial de $50mm^2$ que equivale a 4 AWG, este cable cumple de acuerdo con la norma ITC-BT-07 es tripolar y tiene una intensidad máxima admisible de 180A, este cable deberá ser sumergible y de 3 hilos, el fabricante dice al respecto que “El cable sumergible es especialmente diseñado para las aplicaciones más severas. El material de la cubierta ha sido especialmente diseñado para una máxima resistencia a la abrasión, manteniendo buena flexibilidad para su uso dentro del revestimiento del pozo para suministrar energía a la bomba sumergible”³⁵.

Para finalizar muestran las especificaciones del cable en mención.

Tabla 21. Ficha técnica cable sumergible calibre 4 AWG.

CÓDIGO	* CONDUCTORES X CALIBRE	NIVEL DE AISLAMIENTO (VOLT)	CLASE DE CABLE	AISLAMIENTO INDIVIDUAL	PESO		CAPACIDAD DE CONDUCTANCIA (AMPERES)	CONSTRUCCION	ESPOR DE AISLAMIENTO (mm)	ESPOR DE NYLON (mm)	ESPOR DE CUBIERTA (mm)	DIMENSION EXTERIOR APROX. (mm)
					KG POR CADA 100	≡						
CABLE3X6A	3 X 4	600	C	PVC/NYLON	87	85	19H	1.6	0,16	0,79	9.77X26.16	

Fuente: ALTAMIRA. Cable plano sumergible Altamira (75°C) [en línea]. [Consultado: 20 de julio de 2021]. Disponible en: http://altamirawater.com/downloads/dl/file/id/427/product/6291/ft_ficha_tecnica.pdf

³⁵ ALTAMIRA. Cable plano para bomba sumergible [sitio web]. Colombia; [Consultado: 20 de julio de 2021]. Disponible en: http://altamirawater.com/downloads/dl/file/id/427/product/6291/ft_ficha_tecnica.pdf

4.8. PROTECCIÓN CONTRA SOBREINTENSIDADES ORIGINADAS POR SOBRECARGAS O CORTOCIRCUITOS

Es de vital importancia garantizar las protecciones adecuadas para el sistema, en consecuencia, emplean fusibles para la protección contra sobreintensidades originadas por sobrecargas o cortocircuitos.

Para el sistema eligen cartuchos de fusibles de cuchilla de tipo gPV de uso especial para sistemas fotovoltaicos, según el fabricante Crady, en su ficha técnica de estos, especifica que tienen la “Capacidad de interrumpir sobreintensidades de valores reducidos, asociadas a fallos en sistemas fotovoltaicos (corrientes inversas, fallos múltiples en el sistema)”³⁶.

Para que la selección del fusible sea adecuada, se debe cumplir la siguiente (Ecuación 38) para sobrecargas y cortocircuitos.

$$I_b \leq I_n \leq 0.9 \cdot I_{adm} \quad (\text{Ecuación 38})$$

Donde:

I_b = Intensidad de corriente que recorre la línea.

I_n = Intensidad nominal del fusible asignado a la línea.

I_{adm} = Máxima intensidad admisible del cable conductor de la línea.

A continuación, muestran la tabla del resumen de las protecciones asignadas en cada tramo.

Tabla 22. Protecciones asignadas en cada tramo de la instalación.

Tramo	I_b	I_n	$0,9 \cdot I_{adm}$	Cantidad de fusibles gPV
Paneles - Controlador de carga (Ramal de 7 paneles serie-paralelo)	70,35A	80A	153	2
Paneles - Controlador de carga (Ramal de 5 paneles serie-paralelo)	50,25A	63A	126	1
Controlador de carga - Baterías	190,95A	200A	234A	1
Baterías - Inversor	291,66A	315A	315A	1

Fuente: Autor.

³⁶ GRUPO TEMPER. Fusibles NH clase gPV [en línea]. España: 2021. 1 p. [Consultado: 30 de agosto de 2021]. Disponible en: <http://www.grupotemper.com/catalogo/images/adjuntos2/FT-Fusibles-NH-clase-gPV.pdf>

La columna de interés es la I_n , donde se especifica la corriente en amperios que debe tener el fusible de cuchilla de tipo gPV, en la siguiente tabla muestran la ficha técnica de los fusibles seleccionados.

Tabla 23. Características de los cartuchos de fusibles tipo cuchilla gPV.

Tramo	I_n Corriente (A)	Tensión V_{dc}	Poder de corte (kA)
Paneles - Controlador de carga (Ramal de 7 paneles serie-paralelo)	80	1000	50
Paneles - Controlador de carga (Ramal de 5 paneles serie-paralelo)	63	1000	50
Controlador de carga - Baterías	200	1000	50
Baterías - Inversor	315	1000	33

Fuente: CRADY. Especificaciones generales [en línea]. [Consultado: 30 de agosto de 2021]. Disponible en: <http://www.grupotemper.com/catalogo/images/adjuntos2/FT-Fusibles-NH-clase-gPV.pdf>

Es necesario contar con una protección adicional a la salida de los controladores de carga debido mantenimientos que se presenten, para ello seleccionan magnetotérmicos de corriente continua especiales para utilizarse en sistemas fotovoltaicos, se eligen con base a la corriente de carga nominal del controlador de carga por un factor de seguridad del 25%. Como resultado se necesitan 2 magnetotérmicos mayores a 106.25A y 1 magnetotérmico mayor de 75A. Es de aclarar que el controlador en mención posee internamente protecciones contra polaridad inversa, cortocircuito de salida y sobretensión.

El inversor posee una corriente máxima de carga fotovoltaica de 120A y 80A para los inversores de 8KW y 6KW respectivamente, para la protección de estos utilizan fusibles o magnetotérmicos con un amperaje mayor al dicho, esto con el fin de proteger la entrada DC de los inversores, es de aclarar que el inversor en mención posee internamente protecciones contra sobrecarga, corto circuito y descarga profunda.

Para finalizar y garantizar la protección total del inversor debido a que es el puente entre la corriente DC y AC, protegen la instalación del inversor y la bomba sumergible con un interruptor termomagnético de mínimo 61A.

4.8.1. Cableado de protección

Para la correcta protección de la instalación, además del cable (positivo y negativo) debe haber un cable adicional que es el cable de protección y este conecta todas las masas metálicas de la instalación con el sistema de tierra, buscan evitar diferencias de potencial y descargas de origen atmosférico.

Para la selección del cableado de protección se basan en la siguiente tabla que rige la norma ITC-BT-19.

Tabla 24. *Parámetros para la selección del cableado de protección.*

Secciones de los conductores de fase o polares de la instalación (mm ²)	Secciones mínimas de los conductores de protección (mm ²)
$S \leq 16$	S
$16 < S \leq 35$	16
$S > 35$	S/2

Fuente: Universidad D Córdoba. Tabla 2 [en línea]. [Consultado: 30 de agosto de 2021]. Disponible en: http://www.uco.es/electrotecnia-etsiam/reglamentos/Guia_Tecnica_REBT/guia_bt_19_sep03R1.pdf

Hacen uso de la tabla anteriormente expuesta y se establece la sección que tendrá el cableado de protección en cada tramo de la instalación, como se muestra a continuación:

Tabla 25. *Protección de cableado seleccionado en cada tramo de la instalación.*

Tramo	Secciones de los conductores de fase o polares de la instalación (mm ²)	Secciones mínimas de los conductores de protección (mm ²)
Paneles - Controlador de carga (Ramal de 7 paneles serie-paralelo)	35	16
Paneles - Controlador de carga (Ramal de 5 paneles serie-paralelo)	25	16
Controlador de carga - Baterías	150	75
Baterías - Inversor	240	120

Fuente: Autor.

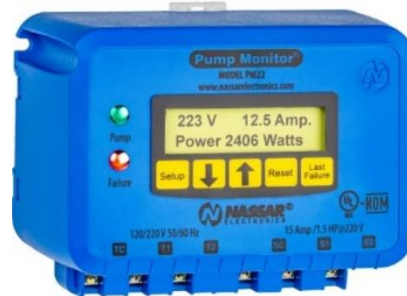
4.9. ARRANQUE Y PROTECCIÓN DE LA BOMBA SUMERGIBLE

Para arrancar el motor monofásico elegido en la sección 3.1.2, optan por un novedoso equipo especialmente diseñado para la protección de bombas monofásicas. Con este dispositivo eliminan el uso del contactor, relevador de sobrecarga, electronivel y monitor de voltaje.

El dispositivo en mención es el PUMP MONITOR MONOFASICO 60 Amp. Modelo PM23 mostrado en la siguiente figura, el fabricante manifiesta que este dispositivo es capaz de "Proteger la bomba por sobrecarga, bajo voltaje, ciclo rápido y por bajo

nivel de succión sin necesidad de electrodos. Mide la potencia de la bomba para determinar cuándo ésta no tiene agua³⁷

Figura 19. Pump monitor modelo PM23.



Fuente: NASSAR ELECTRONICS. Manual de usuario [imagen]. [Consultado: 21 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.nassarelectronics.com.mx/images/descargas/MANUAL%20PUMP%20MONITOR%20MONOFASICO%20PM23-2020.pdf#page=1>

Este dispositivo según el fabricante presenta los siguientes beneficios:

- Protección por baja carga (bomba sin agua).
- Protección por alto/bajo voltaje.
- Protección por ciclo rápido.
- Calibración automática.

Las especificaciones técnicas del mismo son:

Tabla 26. Ficha técnica PUMP monitor monofásico modelo PM23.

Especificaciones	
VOLTAJE DE OPERACIÓN	220 V ± 15 %, 50/60 Hz
AJUSTE DE BAJO VOLTAJE	180-220 V
AJUSTE DE ALTO VOLTAJE	220-260 V
RETARDO DE CONEXIÓN	Ajustable de 1 a 120 Min.
RANGO DEL TRANSFORMADO DE CORRIENTE	16-60 Amp.
CONTACTO A1-A2	10 Amp. max @ 220 VCA
RESTABLECIMIENTO	Manual o automático
VIDA ÚTIL	100,000 Operaciones
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	-10 a + 50 °C.

³⁷ NASSARELECTRONICS. Pump-Monitor® Monofásico [sitio web]. México; [Consultado: 21 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.nassarelectronics.com.mx/images/descargas/Catalogo%20Nassar%20Electronics%202019.pdf#page=9>

CONSUMO	4 Watts Aprox
PRECISIÓN	1.5 - 2.5 %.
DIMENSIONES	14.5 x 10.5 x 6 cm
PESO CON EMPAQUE	0,55 KG

Fuente: NASSAR ELECTRONICS. Especificaciones [en línea]. [Consultado: 21 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.nassarelectronics.com.mx/images/descargas/MANUAL%20PUMP%20MONITOR%20MONOFASICO%20PM23-2020.pdf#page=7>

El fabricante de este dispositivo sugiere el siguiente diagrama de conexión, especificando los siguientes términos.

C = Contactor.

F = Fusible de control de 8 amp.

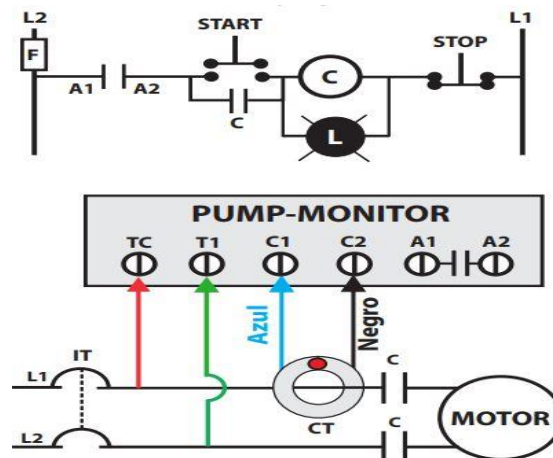
IT = Interruptor termomagnético.

A1 – A2 = Contacto normal abierto del PM-23.

L = Piloto indicador de operación.

CT = Transformador de corriente.

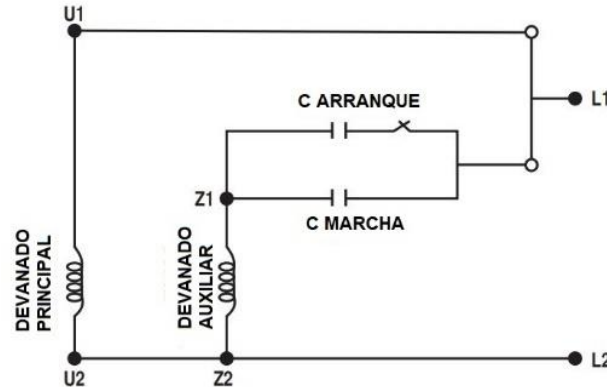
Figura 20. Diagrama de conexión PUMP MONITOR monofásico modelo PM23.



Fuente: NASSAR ELECTRONICS. Conexión eléctrica [imagen]. [Consultado: 21 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.nassarelectronics.com.mx/images/descargas/MANUAL%20PUMP%20MONITOR%20MONOFASICO%20PM23-2020.pdf#page=2>

Por consiguiente, para el arranque del motor sumergible, el fabricante detalla el siguiente diagrama de conexión estándar para motores monofásicos.

Figura 21. Diagrama de conexión estándar para motores monofásicos.



Fuente: PEARL. Standard connection for 1 ph motors [imagen]. [Consultado: 21 de julio de 2021]. Disponible en: <https://pdwatersystems.com/DirectDownload.aspx?format=2&id=511&lg=0>

El fabricante del motor sumergible sugiere los siguientes capacitores de arranque y de marcha para una potencia de 15 HP.

Tabla 27. Capacitores de arranque y de marcha.

Capacitor (uF)		
POTENCIA	CAP. ARRANQUE	CAP. MARCHA
15 HP	300	200

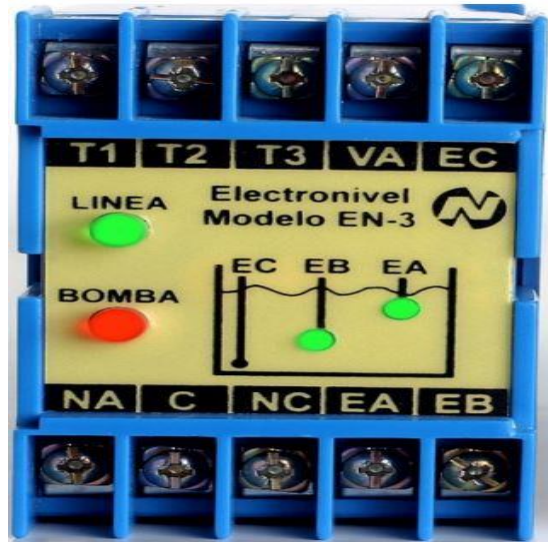
Fuente: PEARL. Standard connection for 1 ph motors [imagen]. [Consultado: 21 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.pdwatersystems.com/catalog/PEARL-CATALOGO-MOTORES-SUMERGIBLES.pdf#page=19>

4.10. ACCIONAMIENTO DE LA BOMBA SUMERGIBLE

El accionamiento automático de la bomba sumergible se requiere debido a que es necesario controlar el nivel del líquido en el depósito del agua, para tal fin hacen uso de un ELECTRONIVEL MODELO EN-3 del fabricante Nassar Electronic, el cual se muestra en la siguiente figura y brinda la siguiente descripción “Los electroniveles controlan automáticamente la operación de la bomba con su contacto interno, incluyen leds que indican el nivel de agua en el depósito, la operación de la bomba y el bajo nivel de succión”³⁸.

³⁸ NASSARELECTRONICS. Electroniveles [sitio web]. México; [Consultado: 21 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.nassarelectronics.com.mx/images/descargas/Catalogo%20Nassar%20Electronics%202019.pdf#page=15>

Figura 22. *Electronivel modelo EN-3.*



Fuente: NASSAR ELECTRONICS. *Manual de usuario, Electronivel Modelo EN-3 [imagen].* [Consultado: 21 de julio de 2021]. Disponible en: https://www.nassarelectronics.com.mx/images/descargas/31_MANUAL_ELECTRONIVEL_EN_3.pdf

El funcionamiento de este electronivel consiste en detectar el nivel del líquido por medio de los electrodos, los electrodos que se exhiben en la siguiente figura son de bronce y cuentan con una cubierta plástica para evitar falsos contactos, están puestos directamente en el tanque y estos operan los contactos para encender o apagar la bomba dependiendo del nivel del líquido en el depósito.

Figura 23. *Electrodos de bronce.*



Fuente: NASSAR ELECTRONICS. *Accesorios y Refacciones [imagen].* [Consultado: 21 de julio de 2021]. Disponible en:

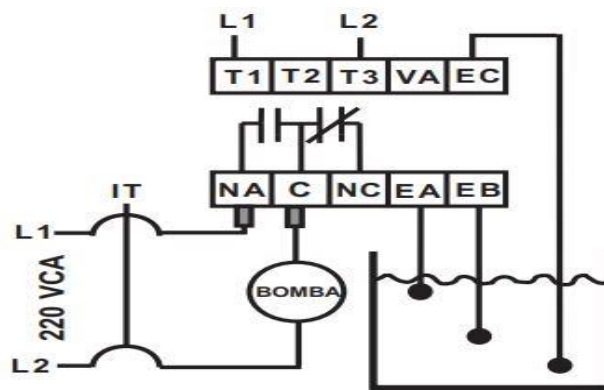
<https://www.nassarelectronics.com.mx/images/descargas/Catalogo%20Nassar%20Electronics%202019.pdf#page=17>

El fabricante recomienda los siguientes ítems para acondicionar los electrodos.

- Se pueden alambrear con cable de calibre 12 al 18.
- El electrodo EC deber estar a no más de 20cm debajo del electrodo EB.
- El electrodo EA no debe estar a más de 15m arriba del electrodo EB.

Para finalizar, exponen en la siguiente figura y tabla el diagrama de conexión del electronivel y la ficha técnica del mismo.

Figura 24. Diagrama de conexión electronivel modelo EN-3 y electrodos.



Fuente: NASSAR ELECTRONICS. Ejemplos típicos de conexión [imagen]. [Consultado: 21 de julio de 2021]. Disponible en: https://www.nassarelectronics.com.mx/images/descargas/31_MANUAL_ELECTRO_NIVEL_EN_3.pdf#page=3

Tabla 28. Ficha técnica electronivel modelo EN-3.

Especificaciones	
VOLTAJE DE ELECTRODOS	18 V.C.A. Max
CORRIENTE DE ELECTRODOS	0.36 mAmp. C.A. Max.
RESISTENCIA DE LIQUIDO	50 Kohms Max.
LARGO DEL CABLE DE ELECTRODOS	300 Metros Max. (5000 Mts. Sobre pedido)
CONSUMO MAXIMO	3 Watts
CAPACIDAD DE CONTACTOS	NA 12 Amp. NC 8 Amp.
CAPACIDAD DIRECTA	1.5 C.F. Max. @ 220 V, 3/4 C.F. Max. @ 120 V
VIDA UTIL DEL CONTACTO	10,000,000 Max. , 200,000 a plena carga
PESO	392 gr
ALIMENTACIÓN	120/220 V.C.A. ± 10% 50/60 C.P.S.

Fuente: NASSAR ELECTRONICS. Especificaciones [en línea]. [Consultado: 21 de julio de 2021]. Disponible en: https://www.nassarelectronics.com.mx/images/descargas/31_MANUAL_ELECTRO_NIVEL_EN_3.pdf#page=5

5. RESULTADOS

En este capítulo abordan en las siguientes dos fichas técnicas, la consolidación de los componentes que comprenden el sistema hidráulico y el sistema fotovoltaico, para finalizar exhiben el diagrama general del sistema de bombeo alimentado por energía solar fotovoltaica en la zona de Cundinamarca.

En la siguiente tabla se detalla la ficha técnica de los componentes que conforman el sistema hidráulico.

Tabla 29. *Ficha Técnica Del Sistema Hidráulico.*

Ficha Técnica Del Sistema Hidráulico	
Chaguaní Cundinamarca coordenadas.	4°55'39.20" N, 74°36'7.70" W
Ítem	Cantidad
Bentonita.	3m ³
Cono de cierre 8" PVC	1 unidad
Tubería ciega RDE21 8" PVC	50m
Filtro de ranura continua RDE 21 8" PVC Ancho de ranura 0.010"	29m
Filtro de grava N° 50 de 0,1 a 0,4 mm diámetro.	1,94m ³
Hormigón ciclópeo para sello sanitario.	1m ³
Bomba sumergible 6PWS230G150	1 unidad
Motor sumergible 6MWCP150C163V	1 unidad
Tubería para columna de bomba en acero 3".	49m
Tubería de acero lisa para llevar al punto de descarga o cárcamo 3".	11,5m
Codos de 90° de radio largo en acero 3"	3 unidades
Válvula de retención acero 3"	1 unidad
Válvula de verificación tipo giratorio acero 3"	1 unidad
Válvula de compuerta acero 3"	1 unidad

Ficha Técnica Deposito de Agua	
Tipo de material.	Concreto reforzado
Forma	Cilíndrica
r_e (Radio externo del tanque)	3,7m
hT (Altura total del tanque)	5,2m
e (Espesor del tanque y loza)	0,2m
d (Lado y ancho de loza)	10m

Fuente: Autor.

En igual forma, definen las especificaciones técnicas del sistema fotovoltaico en la siguiente tabla.

Tabla 30. Ficha Técnica Del Sistema Fotovoltaico.

Ficha Técnica Del Sistema Fotovoltaico	
Panel fotovoltaico	
Marca	Panel Solar 380W 24V Monocristalino PERC JA Solar
Cantidad de paneles	38
Potencia del Panel Solar (P_{max})	380W
Tipo de Célula del Panel Solar	Monocristalino
Rigidez del Panel Solar	Rígido
Dimensiones del Panel Solar	1960 x 991 x 40 mm
Tensión Máxima Potencia (V_{mp})	40.03V
Corriente en Cortocircuito (I_{sc})	10.05A
Eficiencia del Módulo	19.6%
Amperios Máximos de Salida IMP (I_{mp})	9.50A
Tensión en Circuito Abierto (V_{oc})	48.71V
Voltaje de Trabajo del Panel Solar	24V
Peso del Panel Solar	22 Kg
Marco del Panel Solar	Blanco y Gris
Garantía del Panel Solar	25 años
Baterías	
Marca	Batería Estacionaria BAE 48V 3420Ah
Cantidad de baterías	2
Voltaje de la Batería	48V
Energía Útil Almacenada	50%
Medidas de la Batería	215 x 490 x 815 (alto x ancho x alto). Medida por vaso estacionario.
Posición de Trabajo de la Batería	Bornes en la parte superior.
Amperios-Hora de la Batería	3420Ah

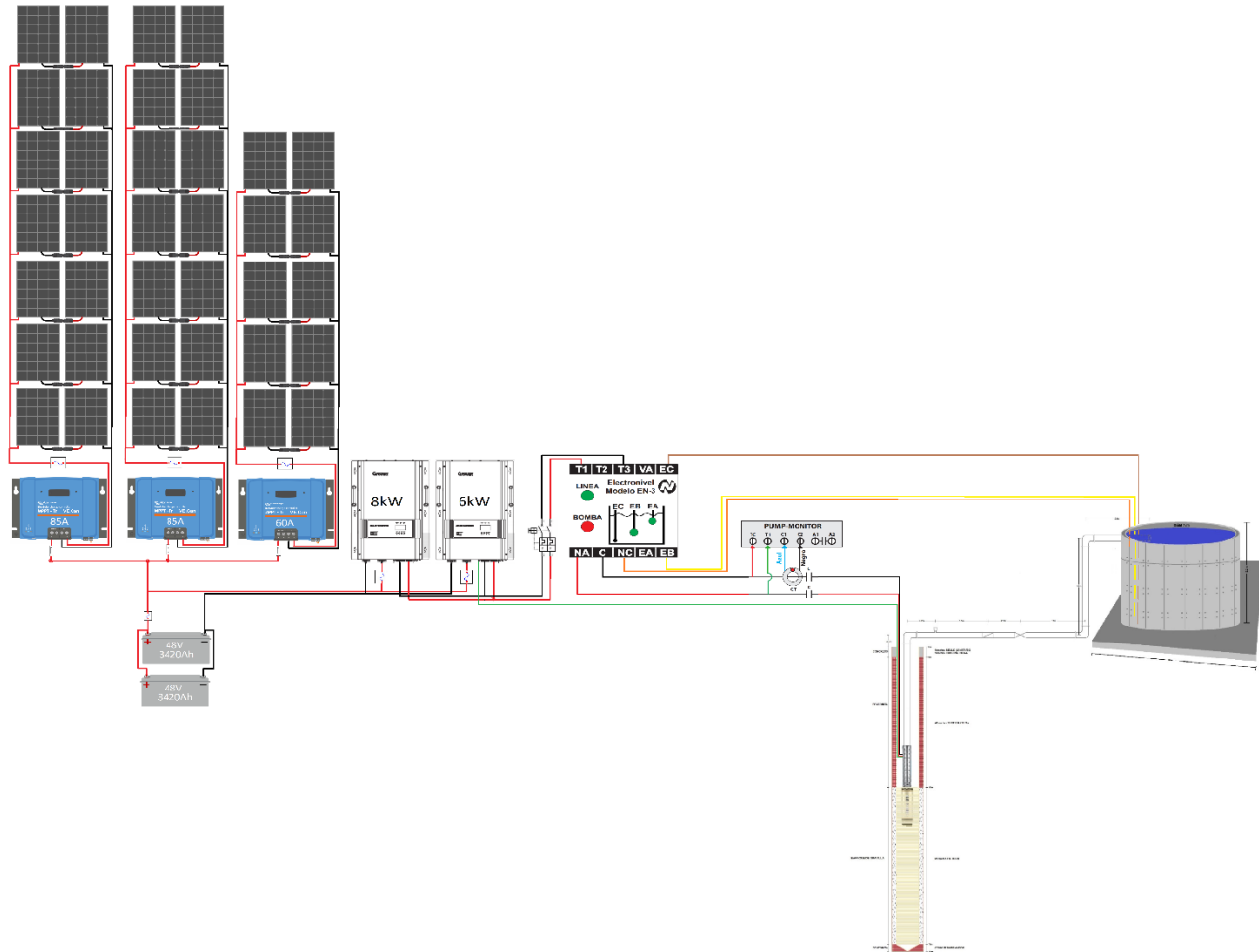
Controlador de carga - 1	
Marca	Controlador Carga SmartSolar MPPT 250/85-Tr Victron Energy
Cantidad de controladores de carga	2
Tensión máxima del circuito abierto FV	250V máximo absoluto en las condiciones más frías 245V en arranque y funcionando al máximo
Eficacia máxima	99%
Voltaje de Trabajo del Regulador	Compatible con instalaciones a 12V, 24V y 48V.
Amperios Máximos de Carga del Regulador	85A
Consumo en Vacío del Regulador	Menos de 1W
Garantía del Regulador	5 años.
Salida de Consumo en DC	Sin salida de consumo en Corriente Continua.
Controlador de carga - 2	
Marca	Controlador Carga SmartSolar MPPT 250/60-Tr Victron Energy
Cantidad de controladores de carga	1
Tensión máxima del circuito abierto FV	250V máximo absoluto en las condiciones más frías 245V en arranque y funcionando al máximo
Eficacia máxima	99%
Voltaje de Trabajo del Regulador	Compatible con instalaciones a 12V, 24V y 48V.
Amperios Máximos de Carga del Regulador	60A
Consumo en Vacío del Regulador	Menos de 1W
Garantía del Regulador	5 años.
Salida de Consumo en DC	Sin salida de consumo en Corriente Continua.
Inversor - 1	
Marca	Inversor Cargador Growatt SPF 8000T DVM
Cantidad	1
Eficiencia del Inversor	Onda Senoidal Pura.
Dimensiones del Inversor	380 x 650 x 225 mm
Voltaje de la batería	48V
Potencia nominal	8KW
Voltaje de salida nominal RMS	104-110-115-120/208-220-230-240VAC
Frecuencia de salida	50Hz/60Hz +/-0.3 Hz
Eficiencia del inversor (Pico)	>85%
Inversor - 2	
Marca	Inversor Cargador Growatt SPF 6000T DVM
Cantidad	1
Eficiencia del Inversor	Onda Senoidal Pura.
Dimensiones del Inversor	360 x 540 x 218 mm
Voltaje de la batería	48V
Potencia nominal	6KW
Voltaje de salida nominal RMS	104-110-115-120/208-220-230-240VAC

Frecuencia de salida	50Hz/60Hz +/-0.3 Hz
Eficiencia del inversor (Pico)	>85%
Cableado	
Paneles - Controlador de carga (Ramal de 7 paneles serie-paralelo)	35mm ²
Paneles - Controlador de carga (Ramal de 5 paneles serie-paralelo)	25mm ²
Controlador de carga - Baterías	150mm ²
Baterías - Inversor	240mm ²
Protecciones electricas	
Tramo de instalación	Fusible
Paneles - Controlador de carga (Ramal de 7 paneles serie-paralelo)	80A (2 unidades)
Paneles - Controlador de carga (Ramal de 5 paneles serie-paralelo)	63A
Controlador de carga - Baterías	200A
Baterías - Inversor	315A
Cableado de protección	Secciones mínimas de los conductores de protección (mm²)
Paneles - Controlador de carga (Ramal de 7 paneles serie-paralelo)	16
Paneles - Controlador de carga (Ramal de 5 paneles serie-paralelo)	16
Controlador de carga - Baterías	75
Baterías - Inversor	120
Arranque y protección de bomba sumergible	Descripción
PUMP MONITOR MONOFASICO 60 Amp. Modelo PM23	Relevador de sobrecarga electrónico que protege bombas y monofásicos.
Controles de nivel	
Electronivel modelo EN-3	Relevador de sobrecarga electrónico que protege bombas y monofásicos.
Electrodos de bronce	Electrodos de latrón para detectar el nivel de agua y otros líquidos.

Fuente: Autor.

En conclusión, ilustran el diseño final de un sistema de bombeo alimentado por energía solar fotovoltaica en la zona de Cundinamarca.

Figura 25. Diseño final sistema de bombeo.



Fuente: Autor.

6. CONCLUSIONES

Para la correcta elaboración de este estudio y cumpliendo con los objetivos propuestos, después de haber diseñado un sistema de bombeo autónomo para la zona de Cundinamarca con bomba sumergible y alimentado mediando energía solar fotovoltaica para almacenarla en un tanque con el fin de utilizar el recurso hídrico cuando se requiera, se obtienen las siguientes conclusiones.

Se establece el sistema de bombeo para la zona rural de Chaguaní Cundinamarca, supliendo las necesidades hídricas en un tanque de agua, la profundidad de perforación del sistema hidráulico se basa en el modelo geoeléctrico que presentó una zona de posible descarga acuífera de interés para extracción de agua subterránea aproximadamente entre los 50 y 80 metros de profundidad, con base en ello se elabora el diseño de un pozo exploratorio de 80 metros de profundidad, en tubería de 8" (pulgadas), 50 metros de tubería ciega en PVC, 29 metros de tubería de ranura continua en PVC con ancho de ranura 0.010" (pulgadas) y un filtro de grava N° 50, para la extracción del agua con el fin de obtener un mejor caudal y aprovechar las condiciones litoestratigráficas del sector, se establece 60.5 metros de tubería de descarga en acero de 3" (pulgadas), se establecieron los parámetros técnicos que comprenden el sistema hidráulico, evitando al máximo las pérdidas que estos generan, se observó que con la buena selección de estos se puede minimizar las pérdidas por fricción, obteniendo un alto rendimiento del sistema, finalmente se diseña el reservorio de agua en forma cilíndrica y en concreto reforzado.

Se determina la potencia que requiere la bomba para el sistema y se selecciona una bomba y motor sumergible comercial de 15HP, esto con el fin de cumplir con las necesidades y requerimientos que demanda el proyecto, en cuanto a caudal y altura para que el recurso hídrico llegue hasta el reservorio, se detalló el consumo energético total del sistema de bombeo y se observa que se requiere de 50424.75W diarios.

El sistema fotovoltaico se dimensionó y se obtuvo un arreglo de paneles solares de 380W de potencia a 24V, en serie y paralelo, 2 baterías de 3420Ah a 48V, 2 controladores de carga de 85Amp y uno de 60Amp y dos inversores con una potencia de 8KW y 6KW, los dispositivos en mención los seleccionan con base al mayor rendimiento que pueden aportar el sistema y cumpliendo con las necesidades energéticas mínimas. Se determinaron componentes que son utilizados en la industria para la protección y control de la bomba sumergible y el nivel del fluido en el reservorio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CAR. Boletín hidrológico [sitio web]. Bogotá; [Consultado: 10 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://www.car.gov.co/uploads/files/6016f3adb2c66.pdf>
- [2] EACNUR. Escasez de agua en el mundo: causas y consecuencias [sitio web]. Madrid; [Consultado: 15 de marzo de 2021]. Disponible en: https://eacnur.org/blog/escasez-agua-en-el-mundo-tc_alt45664n_o_pstn_o_pst/
- [3] PEDRAZA BELTRAN, Cristian Gonzalo. Proyecto de riego utilizando energía solar para el cultivo de limones en la finca contador del municipio de Vianí [en línea]. Trabajo de grado Especialista en gerencia integral de proyectos. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería. 2020. 15 p. [Consultado: 10 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/36184/PedrazaBeltranCristianGonzalo2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [4] ARCEDA, Milton Rafael y HERNÁNDEZ FLORES, Ahiezer David. Proyecto de riego por goteo utilizando energía solar para el cultivo de aguacate en la finca ojo de agua en la localidad de san francisco libre [en línea]. Trabajo monográfico Ingeniero Agrícola. Managua: Universidad nacional de ingeniería. Facultad tecnología de la construcción. Departamento de Ingeniería. 2012. 118 p. [Consultado: 10 de 03 de 2021]. Disponible en: <https://ribuni.uni.edu.ni/1090/1/38223.pdf>
- [5] MORENO GARCÍA, Flor; FIERRO BEDOYA, Juan y LÓPEZ MARTÍNEZ, German Arturo. Modelo a escala de un sistema de riego automatizado, alimentado con energía solar fotovoltaica: nueva perspectiva para el desarrollo agroindustrial colombiano. En: Tecnura [en línea]. Bogotá: Universidad distrital francisco José de caldas, diciembre de 2013. vol. 17, nro. 2. p. 33-47. [Consultado: 10 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/7221/8871>
- [6] ARRIETA MORELO, Denis Javier y PUELLO BRAVO, Sara Yaneth. Diseño y construcción de un seguidor solar para aumentar el rendimiento energético en paneles fotovoltaicos de un sistema de bombeo [en línea]. Trabajo de grado Ingeniería mecánica. Montería: Universidad de Córdoba. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería. 2015 170 p. [Consultado: 10 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/700/Documento%20final%20Seguidor%20solar%20correcciones%20impresion.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [7] RUA, R.E; GONZÁLES, A; GRANADOS, A y RAMÍREZ, R. Diseño estructural de transporte para sistema de bombeo portátil activado con energía solar fotovoltaica

para el departamento de Boyacá. En: Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo. Universidad de Pamplona, enero, 2019, nro. 2. p. 1-11. ISSN 1900-9178.

[8] ROJAS PÉREZ, Dany Erikson. Diseño del sistema de bombeo para el abastecimiento óptimo de agua potable del distrito de Huancán-Huancayo [en línea]. Tesis Ingeniero mecánico. Huncayo: Universidad nacional del centro del Perú. Facultad de Ingeniería Mecánica. Departamento de Ingeniería. 2017. 127 p. [Consultado: 12 de marzo de 2021]. Disponible en: <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3677/Rojas%20Perez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[9] CALLISAYA CAHUAYA, José Antonio. Diseño del sistema de bombeo fotovoltaico para la comunidad de Machacamamarca [en línea]. Proyecto de grado para la obtención del Grado de Licenciatura. La Paz: Universidad mayor de San Andrés. Facultad de Tecnología. Departamento de electricidad. 2013. 232 p. [Consultado: 12 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/bitstream/handle/123456789/9579/PG-1339-Callisaya%20Cahuaya%2c%20Jos%c3%a9%20antonio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[10] SOSA CUTIPA, Elver Demetrio. Diseño del sistema de bomba solar utilizando bomba sumergible híbrido con variador de velocidad para la comunidad Quenafajja del distrito de Acora provincia de Puno [en línea]. Tesis Ingeniero Mecánico Electricista. Puno: Universidad nacional del altiplano. Facultad de ingeniería mecánica eléctrica, electrónica y sistemas. Departamento de ingeniería mecánica eléctrica. 2017. 159 p. [Consultado: 12 de marzo de 2021]. Disponible en: http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/6323/Sosa_Cutipa_Elver_Demetrio.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[11] HIDROBO NINA, Fausto Octavio y BONILLA VASCONEZ, Jorge Luis. “Diseño de un sistema de turbobombeo y riego por aspersion en la comunidad de san franciso de Cunuguachay [en línea]. Tesis Ingeniero Mecánico. Riobamba: escuela superior politécnica de Chimborazo. Facultad de mecánica. Departamento de ingeniería. 2011. 259 p. [Consultado: 13 de 03 de 2021]. Disponible en: <http://dspace.epoch.edu.ec/handle/123456789/1387>

[12] SECRETARIA GENERAL DEL SENADO. Energías Limpias [sitio Web]. Bogotá; [Consultado: 14 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://senado.gov.co/index.php/component/content/article/13-senadores/143-un-atentado-contra-las-energias-limpias>

[13] MINISTERIO DE ENERGÍA. Energías Renovables No Convencionales [sitio Web]. Bogotá; [Consultado: 14 de marzo del 2021]. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/energias-renovables-no-convencionales>

[14] PROGRAMA DESARROLLO PARA LA PAZ DEL MAGDALENA CENTRO. Chaguaní, Cundinamarca [sitio web]. La dorada; [Consulado: 5 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://pdpmagdalenacentro.org/pagina2017/sistema-de->

informacion-irmac-
chaguani/#:~:text=Chaguan%C3%AD%2C%20Cundinamarca.,departamental%20(
de%20116%20municipios).

[15] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Cambio climático y salud humana: Servicios de aguas para la salud [sitio Web]. Bogotá; [Consultado: 7 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.who.int/globalchange/ecosystems/water/es/#:~:text=Cada%20persona%20necesita%20al%20d%C3%ADa,beber%20y%20para%20la%20higiene>

[16] CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Estudio para la determinación de módulos de consumo del recurso hídrico de las 10 cuencas de 2do orden y las ochenta y cuatro cuencas de 3er orden Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR [sitio Web]. Bogotá; [Consultado: 7 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://sie.car.gov.co/handle/20.500.11786/33671>

[17] ATLAS. Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia. [sitio Web]. Bogotá; [Consultado: 1 de junio del 2021]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

[18] VÉLEZ OTÁLVARO, María Victoria. Hidráulica de Aguas Subterráneas. 3ra edición. Colombia; Universidad Nacional de Colombia, 2011. 275 p. ISBN: 958-9352-88-3.

[19] VÉLEZ OTÁLVARO, María Victoria. Hidráulica de Aguas Subterráneas. 3ra edición. Colombia; Universidad Nacional de Colombia, 2011. 286 p. ISBN: 958-9352-88-3.

[20] VÉLEZ OTÁLVARO, María Victoria. Hidráulica de Aguas Subterráneas. 3ra edición. Colombia; Universidad Nacional de Colombia, 2011. 287 p. ISBN: 958-9352-88-3.

[21] LLANCA BLAS, Wilkin Rojas. Diseño de un sistema hidráulico de extracción de agua salobre de pozo profundo para satisfacer la demanda de planta de tratamiento de agua para la empresa Corporación Lindley S.A. – Pucusana [en línea]. Tesis Ingeniero Mecánico. Perú: Universidad nacional del callao. Facultad de ingeniería mecánica – energía. 2015. 227 p. [Consultado: 8 de julio de 2021]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12952/1507>

[22] VÉLEZ OTÁLVARO, María Victoria. Hidráulica de Aguas Subterráneas. 3ra edición. Colombia; Universidad Nacional de Colombia, 2011. 276 p. ISBN: 958-9352-88-3.

[23] SLS ENERGY S.A.S. Consultoría para realizar estudios geoeléctricos, tomografía eléctrica y de resistividades en 5 puntos para la prospección de agua subterránea en el municipio de Cota Cundinamarca [en línea]. Bogotá: 2016. 67 p. [Consultado: 9 de julio de 2021]. Disponible en:

http://emsercota.gov.co/documentos/convocatorias/2018-2cvp/pozo/ESTUDIOS_GEOELECTRICOS.pdf

[24] MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos. 6ta edición. México: Pearson educación, 2006. 395 p. ISBN: 970-26-0805-8.

[25] PEARL. Bombas Sumergibles en Acero Inoxidable 4", 6", 8" y 10" [en línea]. Miami: 2019. 6 p. [Consultado: 2 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.pdwatersystems.com/catalog/PEARL-CATALOGO-BOMBAS%20SUMERGIBLES%20DE%204-6-8-10.pdf>

[26] PEARL. Motores Sumergibles Encapsulados de 6" [en línea]. Miami: 2021. 16 p. [Consultado: 10 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.pdwatersystems.com/catalog/PEARL-CATALOGO-MOTORES-SUMERGIBLES.pdf>

[27] MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos. 6ta edición. México: Pearson educación, 2006. 413 p. ISBN: 970-26-0805-8.

[28] MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos. 6ta edición. México: Pearson educación, 2006. 415 p. ISBN: 970-26-0805-8.

[29] MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos. 6ta edición. México: Pearson educación, 2006. 411 p. ISBN: 970-26-0805-8.

[30] ENEL. Tarifas de energía eléctrica [sitio web]. Colombia; [Consultado: 31 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/espa%C3%B1ol/personas/1-17-1/2020/Tarifario-enero-2020.pdf>

[31] BIRTLH. Rendimiento global y Energía requerida [sitio web]. España; [Consultado: 15 de julio de 2021]. Disponible en: https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/ISF/ISF06/es_IEA_ISF06_Contenidos/websit_e_12_rendimiento_global_y_energa_requerida.html

[32] AUTOSOLAR. Características del Panel Solar 380W 24V Monocristalino PERC JA Solar [sitio web]. Colombia; [Consultado: 16 de julio de 2021]. Disponible en: <https://autosolar.co/paneles-solares-24v/panel-solar-380w-24v-monocristalino-perc-ja-solar>

[33] ABELLA, Miguel Alonso. Sistemas fotovoltaicos [en línea]. Master en energías renovables y mercado energético. Madrid: CIEMAT, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Departamento de Energías Renovables. 2005. 28 p. [Consultado: 16 de julio de 2021]. Disponible en: <https://static.eoi.es/savia/documents/componente45335.pdf>

[34] CAICEDO GÓMEZ, Santiago. Estudio técnico de un sistema fotovoltaico para la generación de energía eléctrica en la Universidad Piloto de Colombia como caso de estudio [en línea]. Tesis Ingeniero Mecatrónico. Colombia: Universidad Piloto de

Colombia. Facultad de ingeniería. 2019. 41 p. [Consultado: 16 de julio de 2021]. Disponible en: <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/5497>

[35] ALTAMIRA. Cable plano para bomba sumergible [sitio web]. Colombia; [Consultado: 20 de julio de 2021]. Disponible en: http://altamirawater.com/downloads/dl/file/id/427/product/6291/ft_ficha_tecnica.pdf

[36] GRUPO TEMPER. Fusibles NH clase gPV [en línea]. España: 2021. 1 p. [Consultado: 30 de agosto de 2021]. Disponible en: <http://www.grupotemper.com/catalogo/images/adjuntos2/FT-Fusibles-NH-clase-gPV.pdf>

[37] NASSARELECTRONICS. Pump-Monitor® Monofásico [sitio web]. México; [Consultado: 21 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.nassarelectronics.com.mx/images/descargas/Catalogo%20Nassar%20Electronics%202019.pdf#page=9>

[38] NASSARELECTRONICS. Electroniveles [sitio web]. México; [Consultado: 21 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.nassarelectronics.com.mx/images/descargas/Catalogo%20Nassar%20Electronics%202019.pdf#page=15>