

Este libro es un trabajo desarrollado con el propósito de guiar a las personas interesadas en integrar a los sistemas convencionales de irrigación de cultivos de árboles frutales, un sistema de bombeo solar fotovoltaico portátil, en el que la electrobomba se acciona con energía obtenida a partir de un arreglo de paneles solares, que captan la radiación del sol y la transforman en energía eléctrica.

Los autores son un grupo interdisciplinario de docentes universitarios que desde su experiencia en docencia e investigación plantean las temáticas que se desarrollan en cada uno de los capítulos que estructuran el libro. Al final de cada capítulo se incluye una amplia bibliografía, como material de consulta que permite profundizar aún más en los temas desarrollados.



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
T U N J A



UNAD
Universidad Nacional
Abierta y a Distancia



BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO:
Sistema portátil para irrigación de cultivos de árboles frutales

BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO:

Sistema portátil para irrigación de cultivos de árboles frutales



Edwin Rúa Ramírez
Saúl Hernández Moreno
Leonardo Cely
Adriana Granados Comba
Ángela María González Amarillo
Rafael Ramírez Alvarado
Andrés Aguirre
Joaquín Mancipe
Carlos Rojas
Edwin Torres Díaz





UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
T U N J A



BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO: SISTEMA PORTÁTIL PARA IRRIGACIÓN DE CULTIVOS DE ÁRBOLES FRUTALES

AUTORES

*Edwin Rúa Ramírez, Saúl Hernández Moreno,
Leonardo Cely, Adriana Granados Comba, Ángela María González Amarillo,
Rafael Ramírez Alvarado, Andrés Aguirre, Joaquín Mancipe,
Carlos Rojas y Edwin Torres Díaz.*

Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja
Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Zona Centro Boyacá
Febrero, 2020



Bombeo solar fotovoltaico: Sistema portátil para irrigación de cultivos de árboles frutales.

ISBN: 978-958-5471-75-7

Edwin Rúa Ramírez, Saúl Hernández Moreno, Leonardo Cely, Adriana Granados Comba, Ángela María González Amarillo, Rafael Ramírez Alvarado, Andrés Aguirre, Joaquín Mancipe, Carlos Rojas y Edwin Torres Díaz.
202 páginas. Tamaño 17x 24 cm

Comité editorial

Fr. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P.
Rector

Fr. Omar Orlando SÁNCHEZ SUÁREZ, O.P.
Vicerrector Académico

Fr. Héctor Mauricio VARGAS RODRÍGUEZ, O.P.
Vicerrector Administrativo y Financiero

María Ximena ARIZA GARCÍA
Directora Ediciones Usta Tunja

Sandra Consuelo DÍAZ BELLO
Directora Investigación e Innovación

Juan Carlos CANOLES VÁSQUEZ
Director Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación - CRAI

Primera edición, 2020

ISBN: 978-958-5471-75-7

Corrección de Estilo:
María Ximena Ariza García

Todos los derechos reservados conforme a la ley. Se permite la reproducción citando fuente. El pensamiento que se expresa en esta obra, es exclusiva responsabilidad del autor y no compromete la ideología de la Universidad Santo Tomás.

Diagramación e impresión: Búhos editores Ltda.



Ediciones Usta
Universidad Santo Tomás
2020

Departamento Ediciones Usta Tunja
Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este libro por cualquier proceso reprográfico o fónico, especialmente por fotocopia, microfilme, offset o mimeógrafo.

Ley 23 de 1982.

CONTENIDO

PRÓLOGO	9
INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO 1. SISTEMA DE RIEGO PORTÁTIL CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	13
1.1 Introducción	13
1.2 Aspectos técnicos.....	15
1.3 Planificación de un proyecto de bombeo PV (PVB).....	21
1.4 Análisis de costos de sistemas de bombeo PVB.....	26
1.5 Optimización de sistemas de bombeo PVB.....	30
1.6 Conclusiones	32
Bibliografía	34
CAPÍTULO 2. CATEGORIZACIÓN TECNOLÓGICA Y COMERCIAL DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS DE DURAZNO DEL MUNICIPIO DE SOTAQUIRA - BOYACÁ.....	43
2.1 Introducción	43
2.2 Materiales y métodos	44
2.2.1 Validación de la herramienta	45
2.2.2 Análisis por componentes principales	45
2.2.3 Análisis clúster	45
2.2.4 Validación de la herramienta	46
2.3 Resultados y Discusión	48
2.3.1 Análisis por componentes principales	48
2.3.2 Resultados del análisis clúster	53
2.3.3 Descripción de los grupos formados.....	55
2.3.3.1 Sistemas productivos tipo 1	55
2.3.3.2 Sistemas productivos tipo 2	55
2.3.3.3 Sistemas productivos tipo 3	56
2.3.3.4 Sistemas productivos tipo 4	56
2.3.3.5 Sistemas productivos tipo 5	56
2.3.3.6 Sistemas productivos tipo 6	57
2.3.4 Discusión de los grupos formados	57
2.4 Conclusiones.....	58

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO PARA IRRIGACIÓN.....61

3.1 Introducción	61
3.2 Diseño de sistemas de tuberías.....	62
3.2.1 Variables de entrada.....	62
3.2.2 Ecuaciones de diseño	63
3.2.3 Determinación de la NPSH	67
3.2.4 Diseño asistido por computador	68
3.2.4.1 Temperatura y fluido a usar en el sistema	68
3.2.4.2 Esquema y alturas de los ramales de succión y descarga del flujo	69
3.2.4.3 Selección de accesorios y tuberías.....	71
3.2.4.4 Selección de altura y salidas en nodos.....	74
3.3 Selección de la bomba.....	75
3.4 Dimensionamiento solar fotovoltaico	79
3.5 Tipos de bombas usadas con energía solar fotovoltaica.....	80
3.5.1 Clasificación general de las bombas	80
3.5.2 Bombas de agua solares	83
3.5.3 Bombas Centrífugas	83
3.5.4 Bombas sumergibles.....	83
3.5.5 Bombas de turbina	84
3.5.6 Bomba de tornillo y pistón.....	84

CAPÍTULO 4. DIMENSIONAMIENTO SOLAR FOTOVOLTAICO, FUNDAMENTOS Y APLICACIONES87

4.1 Conceptos básicos	87
4.1.1 La Energía	87
4.1.2 Instituciones de generación, distribución y comercialización de energía en Colombia	89
4.1.3 Radiación solar	93
4.1.4 Captación de energía solar	95
4.1.5 La energía solar fotovoltaica	95
4.1.6 Sistema fotovoltaico	96
4.1.7 Sistemas fotovoltaicos de conexión a red.....	97
4.1.8 Sistemas fotovoltaicos autónomos	98
4.1.9 Sistemas fotovoltaicos de bombeo	100
4.2 Componentes de sistemas fotovoltaicos	101

4.2.1 Célula Solar	101
4.2.1.1 Parámetros fundamentales de la célula solar	102
4.2.1.2 Funcionamiento de una célula solar	103
4.2.1.3 Fabricación	104
4.2.2 El panel solar	105
4.2.2.1 Tipos de paneles solares	108
4.2.2.2 Elaboración	108
4.2.2.3 Conexión de celdas	109
4.2.3 Regulador de carga solar	111
4.2.3.1 Funciones y tipos de reguladores	112
4.2.4 Baterías	112
4.2.4.1 Características técnicas de las baterías	113
4.2.4.2 Tipos de batería	113
4.2.5 El Inversor	114
4.2.5.1 Inversores para Sistemas Fotovoltaicos	115
4.2.5.2 Características y tipos de inversores	116
4.3 Dimensionamiento de los sistemas solares fotovoltaicos.....	116
4.4 Ejemplo de aplicaciones	119
4.4.1 Vivienda solar aislada.....	119
4.4.1.1 Localización	119
4.4.1.2 Cálculos y selección de componentes	120
4.4.2 Iluminación LED solar fotovoltaica para avenida de 2 km de longitud	125
4.4.2.1 Localización.....	125
4.4.2.2 Cálculos y selección de componentes	126
4.4.3 Sistema de bombeo por medio de energía fotovoltaica.....	131
4.4.3.1 Localización.....	131
4.4.3.2 Cálculos y selección de componentes	132
4.4.4 Torre de iluminación solar fotovoltaico portátil.....	136
4.4.4.1 Localización.....	136
4.4.4.2 Cálculos y selección de componentes	137
4.4.5 Refrigerador solar fotovoltaico para aparta estudio en Tunja	142
4.4.5.1 Localización	142
4.4.5.2 Cálculos y selección de componentes	142
4.4.6 Cercado eléctrico por medio de energía fotovoltaica	147
4.4.6.1 Localización.....	147
4.4.6.2 Cálculos y selección de componentes	147
4.4.7 Refrigerador solar fotovoltaico portátil	151

4.4.7.1 Localización	151
4.4.7.2 Cálculos y selección de componentes	151
4.4.8 Vivienda interconectada a la red con un consumo de 8kw día en Tunja	156
4.4.8.1 Localización.....	156
4.4.8.2 Cálculos y selección de componentes	156
Bibliografía	162

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA DE DISEÑO MECÁNICO PARA BOMBEO PORTÁTIL.....169

5.1 Introducción	169
5.2 Necesidad Primitiva.....	172
5.3 Análisis de la Necesidad.....	175
5.4 Definición del Problema.....	178
5.5 Revisión de soluciones en el pasado.....	180
5.5.1 Análisis de Factibilidad	180
5.5.2 Análisis de Funcionalidad.....	185
5.5.2.1 Análisis Comparativo	185
5.5.3 Diseño Preliminar.....	187
5.5.3.1 Análisis teórico del muelle	189
5.5.3.2 Simulación del muelle.....	192
5.5.3.3 Descripción estructural del vehículo	198
Bibliografía	202

PRÓLOGO

Este libro es un trabajo desarrollado con el propósito de guiar a las personas interesadas en integrar a los sistemas convencionales de irrigación de cultivos de árboles frutales, un sistema de bombeo solar fotovoltaico portátil, en el que la electrobomba se acciona con energía obtenida a partir de un arreglo de paneles solares, que captan la radiación del sol y la transforman en energía eléctrica. Los autores son un grupo interdisciplinario de docentes universitarios que desde su experiencia en docencia e investigación plantean las temáticas que se desarrollan en cada uno de los capítulos que estructuran el libro. Al final de cada capítulo se incluye una amplia bibliografía, como material de consulta que permite profundizar aún más en los temas desarrollados.

En el primer capítulo se introduce al lector en los conceptos básicos relacionados con los sistemas de bombeo solar fotovoltaicos. En el segundo capítulo se hace una actualización en el estado del arte relacionado con el grado de diseño y tecnificación del sistema productivo de duraznero, identificado como el principal frutal perenne en el departamento de Boyacá. En el capítulo tres se tratan los temas relacionados con el diseño hidráulico asistido por computador del sistema de irrigación, como son: el diseño de tuberías, el cálculo del NPSH, la selección de la bomba y los requerimientos de potencia mínimos requeridos en el sistema solar fotovoltaico; finalizando el capítulo se presenta un resumen de los tipos de bombas usadas con

energía solar fotovoltaica. En el capítulo cuatro se presenta la información relativa al diseño de sistemas solares fotovoltaicos y a la selección de los componentes que los conforman; al final del capítulo se incluyen ejemplos prácticos de aplicación en otros campos tecnológicos en viviendas aisladas, cercados eléctricos y refrigeración solar, entre otros. Finalmente, en el capítulo cinco se expone la metodología de diseño mecánico aplicada al sistema portátil de bombeo, se plantea la necesidad que permite definir el problema y a través del desarrollo de la metodología, obtener un diseño preliminar que se ajuste a los requerimientos planteados inicialmente.

Es deseo de los autores que el material desarrollado sea de gran aprovechamiento por la comunidad académica y por las personas interesados en contribuir con la mitigación de los impactos adversos al medio ambiente, que se presentan con el uso de fuentes de energía no renovables. Se espera también que la divulgación del libro contribuya a reducir las brechas tecnológicas entre las comunidades de la región.

Fray. Fernando CAJICÁ GAMBOA, O.P.
Decano de División Ingenierías y Arquitectura

INTRODUCCIÓN

El presente libro de investigación hace referencia al bombeo solar fotovoltaico: sistema portátil para irrigación de cultivos de árboles frutales. Este proyecto nace de la necesidad que tienen los agricultores de irrigar los árboles frutales en tiempos de sequía donde pasan muchas semanas sin lluvia y esta situación puede provocar un estrés hídrico importante en estos cultivos y puede condicionar su futuro desarrollo, así como la producción de la fruta.

El libro está compuesto por cinco capítulos que están relacionados entre sí, partiendo en el primer capítulo con la definición y explicación fundamentada de lo que es un *Sistema de riego portátil con energía solar fotovoltaica*, los aspectos técnicos que se deben tener en cuenta, como se debe planificar un proyecto de bombeo solar fotovoltaico, el análisis de costos de estos sistemas de bombeo solar y la optimización que han tenido estos sistemas a través de técnicas avanzadas de ingeniería. Continúa el segundo capítulo con la *Categorización Tecnológica y Comercial de los Sistemas Productivos de Durazno del Municipio de Sotaquirá – Boyacá*, municipio donde se realizó el proyecto, ya que este es uno de los grandes productores de durazno a nivel departamental. Se realiza una encuesta a una muestra representativa (30 productores) de una población finita con el propósito de identificar los sistemas productivos, los manejos agronómicos en general, los insumos empleados para manejo de plagas, enfermedades y malezas y en especial los tipos de sistemas de riego empleados. Se realizó un análisis estadístico

multivariado, con una herramienta tipo encuesta validada mediante la implementación del alfa de Cronbach y panel de expertos.

En el capítulo tres se hace una explicación de los *sistemas de bombeo solar fotovoltaico para irrigación*, se expone el diseño hidráulico asistido por computador del sistema de irrigación, el diseño de tuberías, el cálculo del NPSH, la selección de la bomba y los requerimientos de potencia mínimos requeridos en el sistema solar fotovoltaico; por último, se presenta un resumen de los tipos de bombas usadas con energía solar fotovoltaica. Continúa el capítulo cuatro con el *dimensionamiento Solar Fotovoltáico, fundamentos y aplicaciones*, aquí se presenta la información relativa al dimensionamiento de sistemas solares fotovoltaicos, selección de los componentes que los conforman; y como valor agregado se incluyen ejemplos prácticos de aplicación en otros campos tecnológicos en viviendas aisladas, cercados eléctricos y refrigeración solar, entre otros. Finalmente, en el capítulo cinco se expone la Metodología de Diseño Mecánico para Bombeo Portátil, donde se presenta una solución práctica a la problemática presente en estos tipos de cultivos, se plantea un vehículo tipo remolque, con dimensiones acondicionadas al espacio entre árboles, con generación eléctrica a través de tres paneles solares fotovoltaicos monocristalinos (sistema a 24 voltios), acumulación de energía a través de dos baterías para dos días de autonomía, un inversor para convertir la corriente directa a corriente alterna y poner en funcionamiento una electrobomba centrífuga a 110 v y 1 hp de potencia. Se hace el análisis de esfuerzos al muelle de amortiguación, a través del software de simulación numérico Ansys Workbench® 15.0, con el fin de encontrar los esfuerzos máximos y comparar con el análisis teórico, para que el muelle pueda funcionar en óptimas condiciones.

CAPÍTULO 1. SISTEMA DE RIEGO PORTÁTIL CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Rafael Andrés Ramírez

Adriana Granados Comba

Ángela González Amarillo

Edwin Blasnilo Rúa Ramírez

1.1 Introducción

Desde el desarrollo de la agricultura hace cerca de 5000 años, la humanidad ha experimentado un desarrollo económico, social y tecnológico que ha permitido la conformación de la sociedad actual. El paso de la sociedad recolectora a la sociedad agrícola permitió al hombre explorar en temas como la ciencia, la filosofía, el arte y la tecnología, además de posibilitar el aumento de la población, dando origen a los grandes reinos e imperios que forjaron los principales aspectos de los países actuales (Hadorn, 2015).

Pero, a medida que crecía la población y el intercambio de productos, la demanda de productos agrícolas aumentaba, y con ella los desafíos como proveer agua para los cultivos, de este hecho nacieron los primeros sistemas de irrigación de la historia. La disponibilidad de agua es uno de los principales factores

que limitan las áreas de cultivo disponible en una región o país. El agua puede ser obtenida a partir de una fuente superficial cercana, de pozos, o de agua lluvia, pero estas fuentes pueden estar sometidas a factores externos que limitan la disponibilidad y calidad del agua.

El bombeo de agua subterránea depende de electricidad que puede ser obtenida de la red local o generada en el lugar empleando combustibles, no obstante, en regiones apartadas donde no hay disponibilidad de servicio de energía eléctrica y el costo del combustible aumenta el precio unitario del agua bombeada, y, por ende, aumenta el costo de cultivo (López-Luque et al., 2015). El uso de sistemas basados en energías renovables como el bombeo de agua solar minimiza la dependencia en las alternativas tradicionales, y minimizan el impacto sobre el medio ambiente.

La energía solar es la fuente renovable más importante disponible en el planeta, su aprovechamiento es de vital importancia para el desarrollo de la sociedad humana y la comprensión de su impacto y alcance a permitido el desarrollo de alternativas amigables con el medio ambiente. El aprovechamiento primario de esta fuente lo realizan las plantas a través de la fotosíntesis, que convierte la radiación solar en energía química a través de una serie de reacciones bioquímicas, dicha energía química, es aprovechada por los animales a través de la ingesta de plantas entrando a la cadena alimenticia (Bhende y Malla, 2012).

En las últimas décadas el interés por el aprovechamiento directo de la energía solar ha aumentado y se ha convertido en una alternativa para el uso de energía eléctrica en regiones donde el acceso a combustibles fósiles o a redes eléctricas es difícil, además de bajar el costo por bombeo a mediano – largo plazo, no solo para su uso en agricultura, sino también en aplicaciones para el abastecimiento de agua en comunidades alejadas en países

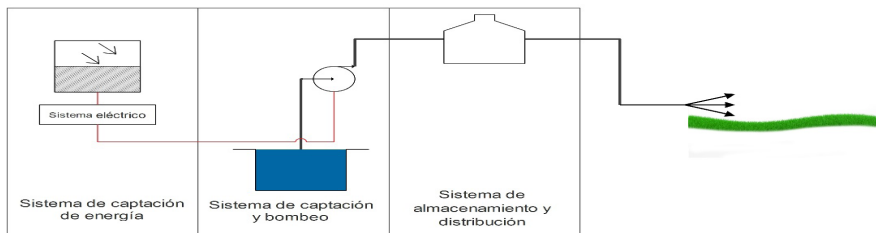
predominantemente desérticos y con un desarrollo económico limitado (Mankbadi y Ayad, 1988).

La energía fotovoltaica (PV) se basa en la habilidad de algunos materiales se transforma de manera directa la radiación solar en corriente eléctrica a través del efecto fotovoltaico descubierto por el físico francés Edmund Becquerel. En 1839, Becquerel descubrió que algunos materiales de tipo semiconductor, al ser expuestos a una fuente luminosa como el sol, generaban una corriente eléctrica. A partir de entonces, varios científicos, incluyendo Albert Einstein, han estudiado, explicado y perfeccionado el uso de dicho efecto con fines prácticos (Ghosh, et al., 2015).

1.2 Aspectos técnicos

Un sistema de bombeo de agua fotovoltaico (SPV) consiste en 3 sistemas básicos, el primero comprende el arreglo de paneles solares que captan la radiación y la transforman en energía eléctrica, que a su vez es transferida al segundo sistema, un motor que impulsa una bomba que transforma la energía eléctrica en energía mecánica necesaria para mover el fluido y tercero, el sistema de conducción del líquido hasta su destino final (Freitas Machado et al., 2014). Estos tres subsistemas tienen características propias y necesitan de sistemas accesorios para realizar su labor dependiendo de las condiciones de la zona y de las necesidades de riego (ver Figura 1).

Figura 1. Diseño metodológico.



Fuente: elaboración propia.

Nota: El sistema no contempla almacenamiento de energía y emplea una bomba de succión desde una fuente subterránea. Fuente: Autores.

La tecnología fotovoltaica es el eje central de la captación de energía solar en los paneles, el fundamento de dicha técnica radica en la propiedad de los semiconductores llamada bandwith. El bandwith es función de la estructura atómica que genera un déficit de energía entre el último nivel de electrones lleno y el primer nivel de electrones vacío. Los electrones en el nivel inferior son promovidos a los niveles superiores al absorber fotones, y si la energía absorbida es lo suficiente, el electrón es expulsado del átomo, generando una corriente eléctrica (Djoudi Gherbi et al., 2017).

Los mejores materiales para la construcción de células fotovoltaicas son las que su bandwith coincide con la región del espectro visible, además, la corriente producida por una célula tiene un voltaje determinado, siendo esta propiedad inherente al material de construcción de la célula. La combinación de estos dos factores es primordial al momento de escoger el material de construcción ideal de una célula fotovoltaica para una determinada aplicación.

Los materiales de construcción de las células fotovoltaicas son un factor de importancia a tener en cuenta al momento de elegir qué tipo de panel solar se ha de escoger (Yahyaoui, 2017). Parámetros como la eficiencia y el costo son primordiales para el cálculo del costo del agua bombeada. En la actualidad se han desarrollado tres generaciones de materiales empleados en células fotovoltaicas. La primera generación comprende las células solares monocristalinas hechas de obleas de silicio monocristalino. La principal ventaja de esta generación es la alta eficiencia que exhiben y su larga durabilidad, gozando de gran popularidad aun hoy en día, pero su proceso de fabricación es costoso gracias a la pureza requerida de los materiales (Yahyaoui, 2017).

La segunda generación de células solares son las llamadas de silicio multicristalino. Estas células son menos costosas de producir ya que el proceso es más sencillo y la pureza de los materiales requeridos es menor, pero igualmente, su eficiencia es menor. La tercera generación de células solares corresponde a las que emplean semiconductores orgánicos y celulares solares sensibilizadas con colorantes o nanoestructuradas (Park, 2015), estas células tienen una alta eficiencia en comparación con las otras dos generaciones, pero los costos de fabricación y materiales empleados son también más altos, lo que limita aun su aplicación a gran escala, sin embargo, la tendencia que muestra esta tecnología es que a mediano y largo plazo el costo de producción disminuye, haciéndola asequible (Joong et al., 2015).

La energía obtenida a partir de las células solares depende de las condiciones climáticas y de la hora del día, ya que estos factores son los que determinan la cantidad de radiación solar que incide en las células. Esta combinación genera la aparición de un punto máximo de poder (MPP), lo que hace necesario que se utilicen sistemas de manejo de potencia como convertidores DC-DC, inversores DC-AC y rastreadores del punto máximo de potencia (MPPT) para aprovechar al máximo la potencia suministrada por el conjunto de células fotovoltaicas (Closas y Rap, 2017).

El segundo sistema es el encargado de transformar la energía eléctrica en energía mecánica para mover el agua. A su vez, este sistema puede dividirse en dos secciones; la primera es el motor y la segunda es el cuerpo de la bomba.

Los motores empleados en los sistemas de bombeo PV deben cumplir con criterios como alta eficiencia, fácil manejo y mantenimiento, así como bajos niveles de ruido. Las células fotovoltaicas generan corriente directa, por ende, el primer tipo de motores a tomar en cuenta son los motores de corriente directa (Glasnovic y Margeta, 2007). A su vez, los motores DC pueden

ser clasificados en dos grandes tipos; motores con escobillas y motores sin escobillas. Los motores con escobillas necesitan de mantenimiento frecuente, lo que implica detener el sistema de bombeo y/o remoción del motor del sistema. Un motor sin escobillas de magneto permanente sincrónico es una alternativa ideal para sistemas donde se conecta de manera directa la salida de energía al motor.

Otra alternativa en el tema de motores es el uso de motores de inducción, que requieren la implementación de un inversor entre la fuente de energía y el motor. El uso de motores de inducción tiene como ventaja un aumento en la eficiencia, menor mantenimiento y más alternativas de control frente a motores DC de prestaciones similares (Abouda et al., 2013). Se han realizado diversos estudios sobre el empleo de motores con o sin escobillas y motores de inducción bajo diferentes condiciones de trabajo, esquemas de bombeo y estrategias de control, donde se obtuvieron los parámetros para asegurar la máxima eficiencia posible de los sistemas de bombeo en condiciones determinadas (Nabil et al., 2013).

El cuerpo de la bomba corresponde a los mecanismos que transforman la energía cinética entregada por el motor en movimiento del fluido. Los tipos de bomba empleados para instalaciones de bombeo de energía PV son generalmente de dos tipos; bombas dinámicas y bombas de desplazamiento. Las bombas dinámicas operan bajo el principio de acción centrífuga sobre el líquido. En el interior del cuerpo de la bomba se encuentran unas aspas que, al girar, desplazan cantidades de fluido en el sentido del giro de la bomba, a un extremo se encuentra la entrada de fluido y en el otro, la salida. El líquido es succionado por la acción del giro de las aspas, se mueve gracias al impulso del movimiento de las aspas y sale impulsado a través de la salida a alta velocidad y presión (Almeida et al., 2018). Este tipo de bombas requieren poco mantenimiento y tienen una alta capacidad de flujo, además de poder ser conectadas de manera directa a la fuente de corriente DC. Generalmente, son

empleadas en aplicaciones de manejo de agua lluvia e irrigación a baja presión.

Por su parte, las bombas de desplazamiento son equipos de desplazamiento positivo, su funcionamiento es similar al que realiza un pistón en un motor de combustión interna en la fase de compresión. A través de una válvula de entrada o admisión, el fluido entra a una cámara a medida que el pistón retrocede, cuando el pistón alcanza su distancia máxima, inicia su recorrido en sentido contrario, lo que genera el impulso de líquido que sale a través de la válvula de salida o desahogo, vaciando la cámara, cuando el pistón alcanza el final de la cámara retrocede, iniciando el ciclo nuevamente (Aliyu et al, 2018). Esta clase de bombas tienen muchas más partes móviles y requieren de lubricación constante, que puede contaminar el fluido bombeado o su fuente, aunque tienen capacidad para elevar fluidos a una distancia mayor que una bomba centrífuga de características similares.

La disposición del conjunto motor – bomba es un elemento a tener en cuenta en el diseño de un sistema de bombeo PV. Existen tres alternativas de configuración que a su vez determinan qué tipo de motor y de bomba es el más adecuado para la aplicación. La primera configuración es la llamada bomba de inmersión o sumergida, donde el conjunto motor – bomba se encuentra sumergido en el fluido a bombear, lo que genera la necesidad que todo el componente eléctrico del conjunto se encuentre aislado del entorno para evitar un cortocircuito (Wade y Short, 2012).

La segunda configuración es llamada bomba de superficie. En esta configuración, generalmente el motor se encuentra aparte del cuerpo de la bomba, lo que facilita el mantenimiento y vigilancia del conjunto. La fuerza motriz del motor es transmitida a través de un eje de rotación que impulsa la bomba. La tercera configuración se encuentra en medio de las dos anteriores y es llamada configuración de bomba flotante, donde el conjunto

bomba – motor se encuentra en una superficie que flota de manera libre o semilibre sobre la superficie del cuerpo de agua (Spindler et al., 1996).

La elección de la configuración más adecuada para una determinada aplicación está determinada por la distancia a la que se encuentra la fuente de agua, la facilidad de acceso al líquido, la distancia a la que se requiere bombear el líquido y el costo de instalación y mantenimiento. En el caso de la primera configuración, la carga que debe suministrar la bomba debe ser como mínimo igual a la energía necesaria para elevar el líquido desde la superficie del cuerpo de agua hasta el reservorio, en la segunda, la carga a suministrar debe contemplar la distancia desde el punto de entrada de líquido o succión y la altura a la que se debe bombear y la tercera, la distancia desde la superficie del líquido hasta el reservorio (Ba et al., 2018).

El último sistema es el encargado de almacenar y distribuir el agua para su uso. Como la disponibilidad de potencia para el sistema depende de la energía capturada por las células solares y a su vez, esta depende de las condiciones climáticas y de las horas luz disponibles en la región, generalmente se contempla en el diseño la incorporación de uno o más tanques de almacenamiento de líquido ubicados a altura donde se puede almacenar el agua para su posterior uso. El sistema de almacenamiento y distribución incluye la tubería de conducción desde la salida de la bomba hasta el o los tanques de almacenamiento, los filtros y sedimentadores que puedan ser necesarios para obtener un líquido en buenas condiciones para su uso, el sistema de control de nivel que puedan tener los tanques, el sistema de control distribución de líquido y toda la tubería y accesorios necesarios para su correcto manejo.

La altura a la que se construya el sistema de almacenamiento está en función de la pérdida de presión que puede generarse a través del sistema de riego, así que es necesario realizar el estudio

hidráulico de manera precisa para asegurar una completa distribución a todo el sistema.

La conjunción de los anteriores tres sistemas y sus correspondientes subsistemas crean el sistema de bombeo PV, es recomendable iniciar el dimensionamiento del sistema iniciando con el tercer sistema (distribución) para conocer las necesidades de presión, y por ende la altura a la que deben estar instalados los tanques de almacenamiento, con este dato, se puede seleccionar el mejor conjunto de bomba y motor, así como la configuración más adecuada para la necesidad, teniendo en cuenta la ubicación y calidad de la fuente de agua a emplear, además de calcular la potencia requerida por el motor para impulsar la bomba para bombear el líquido requerido. Con este último dato, se puede estimar las dimensiones y prestaciones de las células solares requeridas para suministrar dicha potencia a la bomba, en función de parámetros como la radiación solar incidente en la zona, temperatura promedio del lugar, eficiencia de los paneles disponibles, necesidad de equipos accesorios como convertidores, baterías, sistemas de control, entre otros (Yeşilata y Firatoglu, 2008). Como se puede observar, la cantidad de parámetros y variables a evaluar son abrumadores, y no se puede realizar una optimización de manera directa, pero se han desarrollado técnicas de optimización que serán revisadas más adelante.

1.3 Planificación de un proyecto de bombeo PV (PVB)

Realizar un proyecto de instalación de un sistema de bombeo fotovoltaico, como cualquier proyecto, debe tener un esquema general para asegurar el éxito. El primer paso en la planificación es analizar el problema a resolver, haciendo énfasis en las condiciones locales específicas del lugar o zona a beneficiar (Fedrizzi et al., 2000; Narvarte et al., 2018).

Un aspecto que se debe tener en cuenta es la fiabilidad técnica. La tecnología de bombeo fotovoltaico es extremadamente confiable, pero eso por sí solo no es suficiente para que el servicio esté siempre disponible. Cualquier tecnología requiere mantenimiento preventivo y correctivo, y es necesario tener en cuenta estas peculiaridades al momento de proponer un proyecto de bombeo PVB. Se debe asegurar que el sistema tenga soporte técnico disponible para resolver cualquier inconveniente técnico y se mantenga en funcionamiento.

Otro aspecto previo para tener en mente es las características geográficas de la zona que se va a intervenir. El desarrollo de un proyecto de suministro de agua para una comunidad ubicada en un área árida en la que no hay otra fuente de suministro, puede diferir mucho de un proyecto de aprovisionamiento para una comunidad ubicada en un área húmeda y con otras fuentes como lluvia, represas, ríos y fuentes de agua (Koner, 1993). En el primer caso, las reducciones o interrupciones del suministro de agua pueden causar trastornos mucho más graves que en el segundo caso, por lo que es importante cuantificar la autonomía del sistema en cada situación.

La geología local y la calidad del agua, así como las características geográficas y culturales, tienen peso de importancia en el diseño final del proyecto. El conocimiento profundo del problema a resolver, así como las formas de aprovisionamiento preexistentes al proyecto, es fundamental para la optimización de la solución a proponer, así como lograr una mejor aceptación del servicio por parte de los usuarios y reducir los impactos negativos del proyecto (Valer et al., 2017).

Otro tema básico para la solución del problema está relacionado con las características socioeconómicas y culturales de la comunidad. La forma en que se introduce la nueva tecnología, las condiciones materiales, los antecedentes de los usuarios y las estructuras organizativas juegan un papel importante en el uso y mantenimiento del equipo. Por lo tanto, las visitas a la

comunidad receptora son útiles, al igual que el contacto con entidades que han estado trabajando con esa comunidad, como instituciones de carácter rural, sanitarias y educativas, grupos religiosos y organizaciones no gubernamentales, entre otras (Berger, 2017).

Uno de los primeros análisis que se tienen que realizar, incluso antes de la formulación del proyecto es la evaluación de la calidad del recurso hídrico que se utilizará, ya que el fracaso de muchos proyectos está relacionado con la falta de información sobre las características del recurso hídrico local disponible. Es inútil desarrollar un excelente sistema de aprovisionamiento si el recurso hídrico es inadecuado para el consumo, como en el caso de los recursos hídricos con altas concentraciones de sales o compuestos ferrosos. Además, la composición fisicoquímica del agua puede dañar los equipos de bombeo y distribución a través de procesos de abrasión y corrosión dentro de la bomba y la sedimentación de composiciones calcáreas dentro de los mecanismos hidráulicos (Hadwan y Alkholidi, 2018).

Algunos de esos problemas pueden resolverse fácilmente. Por ejemplo, cuando el agua tiene grandes cantidades de partículas sólidas en suspensión, se puede instalar un filtro para reducir el proceso de abrasión de los mecanismos internos y el bloqueo de la tubería. Pero esto solo puede hacerse durante la construcción del pozo o cuando el diámetro del pozo existente es sensiblemente más grande que el de la bomba, ya que algunos tipos de filtros internos reducen el diámetro interno sensiblemente. Para reducir la cantidad de partículas suspendidas en el agua, existen productos químicos con propiedades de floculación y decantación; por otro lado, este proceso debe llevarse a cabo en el agua almacenada en el reservorio, después de su paso a través de la bomba (Karmakar, 1999). El tratamiento del agua con cantidades indeseables de sustancias químicas suele ser más complejo y costoso y requiere, por ejemplo, diferentes tecnologías de destilación, electrólisis y filtración a altas presiones (ósmosis inversa), entre otros procesos. La descontaminación microbiana

es relativamente fácil y barata; sin embargo, necesita atención en la administración del proyecto, debido a la necesidad de comprar productos químicos y la capacitación para su utilización (Narvarte et al., 2005).

Otro problema frecuente es el desconocimiento de parámetros de ingeniería necesarios para aprovechar la fuente hídrica, como los niveles estáticos y dinámicos y la capacidad de reemplazo. Estos parámetros pueden experimentar grandes variaciones dependiendo de la composición de los sustratos geológicos, pluviometría y topografía, y pueden ser decisivos para una buena configuración del sistema; por lo tanto, es necesario realizar pruebas de capacidad del pozo antes de iniciar una etapa de prediseño y diseño del sistema de bombeo (Zhang et al., 2017).

Para determinar la mejor forma de suministro de agua, es esencial saber cómo se va a realizar la distribución del líquido; si la recolección y el uso del agua se llevará a cabo en puntos comunitarios o directamente a residencias empleando una red de distribución, y qué consideraciones hay con respecto a la disposición final del agua después de su uso. El conocimiento de la topografía y el drenaje de la zona también proporciona información para evitar posibles problemas sanitarios futuros como consecuencia del nuevo suministro de agua (Qoaider y Steinbrecht, 2010).

También es necesario plantear la necesidad de incluir expertos en el área de ciencias sociales para asegurar una interacción correcta con la comunidad a intervenir y los métodos que han empleado de manera tradicional para abastecerse de agua. La mejor forma de suministro de agua no siempre se logrará a través de una tecnología de distribución de vanguardia, sino que consistirá en la forma sanitaria más adecuada para la situación de la región (Elasaad et al., 2015). Una comunidad sin sistema de alcantarillado, por ejemplo, una mejor estrategia puede ser proporcionar el suministro de agua a través de

puntos de entrega colectiva y no en puntos individuales en cada residencia, con el fin de reducir los vertimientos al suelo y los focos de insectos cerca de los lugares de vivienda.

La siguiente etapa de análisis consiste en determinar cuál sistema de motor – bomba es el adecuado para resolver las necesidades de suministro de agua según los datos recolectados en las etapas anteriores. Cada situación puede tener una solución única y particular que permita satisfacer la demanda de fluido y no se deben preestablecer respuestas que puedan desembocar en el fracaso del proyecto.

Una vez determinada la solución que se adapta de mejor manera a la situación de la comunidad o la región, es necesario realizar los cálculos de demanda hídrica. Para una comunidad, la cantidad de agua necesitada por cada persona es fácilmente calculable con base a sus hábitos de consumo. Si la necesidad es con fines agroindustriales, la cantidad de variables para tener en cuenta aumentan como el tipo de cultivo a irrigar o animales a abastecer, clima local y estacional, las características socioeconómicas y culturales de la comunidad (Mandelli et al., 2016). También es recomendable estimar el crecimiento de la demanda por un espacio de tiempo determinado igual o mayor al tiempo que el tiempo de retorno estimado para el proyecto.

Una vez realizado todos los cálculos correspondientes al apartado técnico e implementado el sistema de bombeo, se presenta la siguiente etapa del proyecto que consiste en la introducción de la tecnología o transferencia tecnológica hacia la comunidad. El proceso de introducción de tecnologías en comunidades pequeñas es un proceso complejo y poco entendido, ya que es más que simplemente aceptar la aparición de nuevas técnicas y materiales, sino que incluye el cambio en aspectos culturales, sociales y psicológicos del individuo y la población (Fedrizzi et. al., 2009). Por esta razón, es importante tener en cuenta el aspecto e impacto social de la implementación de un proyecto de bombeo PV al momento de formular el proyecto,

así como en las etapas de implementación y puesta en marcha para asegurar el éxito del proyecto y su duración en el tiempo.

Unido a la transferencia de tecnología, se debe establecer un sistema de gerencia para el mantenimiento del sistema de bombeo. Los proyectos de sistemas de bombeo con energía solar se implementan para dar solución a un problema constante, y por lo tanto, es necesario asegurar su funcionamiento a largo plazo, más allá del tiempo de retorno de la inversión inicial, por esta razón, es necesario crear e implementar sistemas de gerencia que le permitan a la comunidad beneficiada realizar mantenimientos preventivos, así como el reemplazo de partes y equipos averiados. Las necesidades de mantenimiento y arreglo del equipo de bombeo plantean la necesidad de financiamiento del sistema a mediano y largo plazo. Una alternativa es establecer recursos para este fin en la etapa de concepción del proyecto, pero siempre existirá la limitación de tiempo y de recurso para mantener operativo el sistema de bombeo, entonces surge la segunda alternativa, la implementación de un sistema de gerencia y administración encargado del manejo y mantenimiento del sistema de bombeo en beneficio de la comunidad. Esta administración debe recaudar recursos destinados a dicho fin y las características y herramientas con las que cuente depende de aspectos sociales, culturales y legislativos propios de la comunidad o región (Zilles y Fredrizzi, 1999).

1.4 Análisis de costos de sistemas de bombeo PVB

Desde el desarrollo de la tecnología fotovoltaica, se ha considerado esta fuente de energía como costosa en comparación de otras fuentes más tradicionales, sin embargo, en los últimos años se ha generado un aumento en la capacidad de producción de energía fotoeléctrica, lo que ha traído una baja considerable en los costos de acceso a dicha tecnología. El desarrollo de nuevas tecnologías de producción, así como el aumento en los volúmenes de producción de células en países altamente industrializados y la competencia industrial entre países asiáticos, ha propiciado la

baja en los costos finales de unidades fotovoltaicas, renovando el interés en las aplicaciones prácticas de la energía fotovoltaica.

Para realizar un análisis de costo minucioso, es necesario tener en cuenta los factores de demanda y oferta del mercado, por ejemplo, al realizar estudios con base a los datos obtenidos de 8 instalaciones de PV en Irlanda a lo largo de tres años, las conclusiones fueron que era necesario estimar de manera cuidadosa la oferta y demanda de agua en un proyecto, ya que este factor es de suma importancia para la viabilidad económica del proyecto (Odeh et al., 2006).

Un estudio de caso interesante es el presentado por Jamil et al. (2012). Propuso un sistema de bombeo solar de agua para cumplir con los requisitos de agua de una institución en Nueva Delhi, India. El análisis técnico-económico del sistema de bombeo basado en PV se comparó con un sistema existente. El período de recuperación del sistema propuesto fue de 4 años, con una vida útil estimada de 20 años, pudiendo suministrar agua gratis durante 16 años, lo que supone un gran ahorro y también reduce la dependencia de la red de los sistemas de bombeo eléctricos y diésel. El costo total inicial fue de \$ 20,000.

En caso de sistemas de abastecimiento para múltiples unidades, las mediciones detalladas en un sistema de bombeo de agua fotovoltaico experimental equipado con un generador fotovoltaico de 610Wp instalado para abastecer de agua a lugares remotos de Grecia reportó que el sistema funciona de manera confiable con pérdidas eléctricas relativamente bajas de aproximadamente el 10% con bajo impacto medio ambiental (Kaldellis et al., 2011).

Hamidat (1999), realizó un estudio para la aplicación de tecnología PV en agricultura para zonas desérticas. El análisis de rendimiento eléctrico e hidráulico fue hecho en un sistema consistente de una bomba centrífuga de superficie para tres conjuntos fotovoltaicos y varias cabezas dinámicas totales y

concluyó que el caudal anual promedio es de aproximadamente 60 m³ / día a 14,5 m / cabeza, el costo del agua entregada se encuentra en US \$ 0.04 / m³. El estudio recomienda utilizar bombas fotovoltaicas de superficie para suministrar agua en las regiones remotas del Sahara para el desarrollo socioeconómico de la región.

Para la instalación de sistemas de bombeo fotovoltaico generalmente es necesario la adquisición de un crédito, y este factor debe ser tenido en cuenta en un análisis financiero más completo. Purohit y Kandpal (2005), presentaron la evaluación del desempeño financiero de una bomba de agua fotovoltaica en India, estimando factores como el valor presente, la inversión interna de la tasa de retorno y el costo unitario del agua, incluidos los efectos de incentivos financieros, la depreciación y la obtención de un préstamo a bajo interés. También se tuvieron en cuenta los precios del Diesel y la electricidad. El principal resultado del estudio fue que, con los costos más altos, las bombas fotovoltaicas pueden no ser financieramente viables para los usuarios potenciales en la India.

El software RETScreen es un paquete informático desarrollado por el gobierno canadiense que permite la evaluación y la optimización de proyectos de energía limpia. Se emplea a nivel mundial y se encuentra disponible en 36 idiomas. Empleando dicho software, se ha desarrollado un estudio técnico y financiero del sistema de bombeo de agua fotovoltaico para el riego de los campos agrícolas en Gorgan, Irán, concluyendo que el costo de instalación del proyecto de bombeo de agua por PV es muy alto, pero, en comparación con alternativas tradicionales, se observan ahorros considerables (Rezae y Gholamian, 2013) .

El potencial de uso de un sistema de bombeo PV depende en gran medida del acceso a tecnologías eficientes a bajo costo, por ejemplo, Foster y Hanley (Chandel et al., 2015) estudiaron más de 130 tipos de sistemas de bombeo de agua fotovoltaicos de aproximadamente 2 kWp de tamaño instalados en ocho estados

de México. El acceso a piezas de calidad a bajo precio, mano de obra calificada y asistencia técnica aumentaron la viabilidad de las instalaciones. A su vez, el uso de esta tecnología dio lugar a precios bajos y alta calidad en productos agrícolas en México.

Las políticas estatales para incentivar el uso de energías alternativas es clave para la implementación de dichas soluciones, ya que los costos pueden ser muy altos para ser asumidos en su totalidad por el consumidor final. Cota et al. (2004), examinó 46 sistemas de bombeo de agua instalados en el marco del Programa Mexicano de Energía Renovable (MREP), un programa de colaboración patrocinado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE). Los resultados obtenidos demostraron que la mayoría de los sistemas financiados, después de 10 años de operación, mostraron ser una excelente opción para satisfacer las necesidades de bombeo de agua en las zonas rurales de México, donde los servicios de red eléctrica no están disponibles. Además, se encontró que la recuperación promedio de la inversión para los sistemas de bombeo de agua fotovoltaica fue de 5 a 6 años, aunque algunas de las instalaciones tuvieron tiempos de retorno de inversión en la mitad de ese tiempo.

La mitigación en la generación de dióxido de carbono es uno de los atractivos para el uso de tecnologías basadas en energía solar y la estimación de la disminución del impacto ambiental es uno de los factores de decisión al momento de implementar dicha tecnología. Un estudio desarrollado en la India y que incluyó la creación de un método de cuantificación de las emisiones de dióxido de carbono mostró que, para una bomba alimentada por PV de 1,8 kW a 5,5 kWh/m² de disponibilidad diaria de radiación, el costo unitario de la mitigación de emisiones de dióxido de carbono se puede estimar en cerca de US \$ 169.38 / tonelada y US \$ 405.06 / tonelada en el caso de sustitución de Diesel y uso de electricidad tradicional, respectivamente (Kumar y Kandpal, 2007).

El uso de sistemas de bombeo fotovoltaico en estados propensos a la sequía en EE. UU. como Wyoming, Montana, Idaho, Washington, Oregón, y parte de Texas fue analizado en un estudio (Meah et al., 2008). El costo elevado de la instalación de redes eléctricas en zonas apartadas de dichos estados hace que el uso de tecnologías de bombeo PV una alternativa para la disponibilidad de agua para el ganado en lugares remotos y presentaron un estudio detallado para usar sistemas de bombeo con energía fotovoltaica en el estado de Wyoming, en el oeste de EE.UU. El estudio analizó el rendimiento de 75 sistemas en funcionamiento y mostró un excelente rendimiento y rentabilidad además del beneficio de la reducción de las emisiones de dióxido de carbono.

La identificación de los retos tecnológicos y técnicas relacionados con los sistemas de bombeo de agua fotovoltaicos para comunidades tradicionales, como la concepción del proyecto, disponibilidad de agua, configuración del sistema, estimación de la demanda de agua, el proceso de transferencia de tecnología y la gestión de proyectos. Los autores informaron que el fallo de los sistemas de bombeo fotovoltaico se produce porque no se tienen en cuenta los problemas relacionados con las condiciones locales y los métodos de transferencia de tecnología (Fedrizzi et al., 2009).

1.5 Optimización de sistemas de bombeo PVB

La implementación y uso de tecnología solar para el bombeo de agua en zonas sin conexión eléctrica es una tecnología bien desarrollada con miles de instalaciones en todo el mundo. El enfoque común para optimizar una instalación se basa principalmente en la mejora de la efectividad de varios componentes del sistema con el objetivo de minimizar el costo total. Sin embargo, se ha señalado varias veces que este enfoque adolece de parámetros tales como calidad sistemática y calidad estática, dando como resultado la no obtención de resultados óptimos (Glasnovic y Margeta, 2007).

Para realizar una optimización con la cantidad de variables que se presentan en un proyecto de bombeo de agua fotovoltaico, es necesario utilizar técnicas avanzadas como redes neuronales, optimización computacional y algoritmos genéticos. Se han publicado muchos estudios con propuestas de algoritmos de optimización totales o parciales (Shahzad et al., 2017; Dursun y Özden, 2017), y pueden emplearse en diversos escenarios ajustando los respectivos parámetros.

Los algoritmos genéticos (GA) se han utilizado para encontrar el tamaño óptimo de un sistema de bombeo PV, como una técnica de optimización reconocida (Merei et al., 2013). El problema de optimización tiene como fundamento encontrar el tamaño óptimo de los sistemas de bombeo para el riego utilizando una función objetivo bajo un requisito previo. La función objetivo es maximizar el beneficio anual, establecido por el saldo entre los ingresos anuales, el costo de capital inicial y el costo anual de operación, mantenimiento y reemplazo. De este modo, la función objetivo primero maximiza el rendimiento del cultivo medido en toneladas por hectárea - año y, en consecuencia, el ingreso anual Rann y, además, minimiza el tamaño del sistema de bombeo solar PV y, por ende, la suma del costo de capital inicial anualizado y la operación anual correspondiente a mantenimiento y costo de reemplazo.

El requisito previo para aplicar algún algoritmo de optimización es tener cero fallas en el sistema y/o garantizar el 100% de confiabilidad y sostenibilidad del sistema de bombeo durante toda la temporada de riego. La falla del sistema de bombeo se puede estimar como la reducción de horas de servicio del sistema o la reducción del volumen diario de bombeo de agua diario necesario para abastecer la demanda.

Como restricciones al modelo de optimización se deben incluir parámetros como la disminución del nivel del agua subterránea debido a su explotación, y la disponibilidad del recurso hídrico en la zona de estudio a lo largo del año. Si

esas dos restricciones no se tienen en cuenta en el proceso de optimización, la capacidad del sistema de bombeo PV se puede sobredimensionar, lo que puede acarrear la sequía del pozo, la falla de la bomba y el fracaso general del proyecto y de la gestión sostenible del agua. Además, un sistema sobredimensionado también implica mayores costos iniciales de capital.

Para alimentar el algoritmo de optimización, es necesario desarrollar los modelos de los sistemas motor - panel, inversor y bomba de agua, así como conocer la demanda de agua del cultivo, respuesta de agua subterránea al bombeo y crecimiento de cultivo. El modelo del motor – panel debe calcular la conversión de la radiación solar en energía. El modelo inversor-bomba debe simular el comportamiento del sistema de ajuste de energía y la bomba en concordancia con la energía obtenida del generador fotovoltaico. El modelo de demanda de agua del cultivo debe diseñarse para evaluar las necesidades de agua del cultivo tanto para propósitos de diseño como de simulación.

Los modelos de suministro de agua subterránea y crecimiento de cultivos simulan el efecto del bombeo de agua en el nivel de agua subterránea y/o de la fuente de abastecimiento y el rendimiento de los cultivos, respectivamente. Para garantizar un funcionamiento correcto y continuo del sistema y para una explotación sostenible del agua subterránea, la cantidad de agua subterránea tienen que ser mayor a la demanda de agua predicha por el modelo del cultivo, de lo contrario, el proyecto no será sostenible a mediano – largo plazo.

1.6 Conclusiones

El agua es un elemento esencial para el desarrollo del ser humano como individuo y como comunidad, por esta razón, los asentamientos humanos han buscado estar cerca de fuentes continuas de agua.

El actual crecimiento de la población humana, unido al impacto que tiene las actividades antropogénicas en el ambiente, han reducido de manera considerable la posibilidad de acceso al agua y las tierras disponibles para la agricultura.

En algunas zonas, el agua se obtiene de un pozo o de zonas alejadas al lugar de la necesidad, por lo que es necesario instalar equipos como bombas para impulsar el líquido, tuberías para su conducción y tanques para su almacenamiento para posterior uso. Pero el uso de estos equipos requiere el uso de una fuente de energía para bombear el agua, lo que plantea un nuevo desafío.

Las opciones tradicionales son el empleo de motores a base de combustibles fósiles, generadores eléctricos también alimentados por combustibles derivados del petróleo o el uso de energía eléctrica proveniente de la red local.

Pero en zonas apartadas donde la red de distribución eléctrica no ha llegado, el uso de combustibles fósiles aumenta el costo del uso de agua. Para poder subsanar este problema, desde hace varias décadas se ha planteado el uso de energía solar.

La tecnología fotovoltaica permite el uso de la radiación solar incidente como fuente de energía eléctrica. La evolución y desarrollo de la tecnología ha permitido su masificación y aplicación en diversos campos como en el bombeo de agua en regiones apartadas.

Alrededor del mundo se han implementado proyectos e iniciativas que emplean la radiación solar para el bombeo de agua con diversos fines como agricultura, ganadería y uso humano. El estudio de los resultados obtenidos ha permitido establecer parámetros técnicos, científicos y sociales para la implementación de esta tecnología.

La concepción de un sistema de bombeo fotovoltaico (PV) tiene una serie de etapas que permiten asegurar el éxito del proyecto, desde la obtención de datos de campo para la elección de una configuración adecuada para el lugar hasta la puesta en marcha y transferencia del proyecto a la comunidad objetivo, implicando a profesionales de diversas ramas, desde ingenieros mecánicos, eléctricos, electrónicos, agrónomos pasando por geólogos y geógrafos, hasta profesionales en el área social como trabajadores sociales y psicólogos, quienes intervienen en diversas etapas y aspectos del proyecto.

Las finalidades de instalar un sistema de bombeo PV son diversas, y, por lo tanto, los impactos también son variados. En el caso de la agricultura, se puede aumentar la productividad del cultivo. Si el agua va a ser destinada a ganadería, el impacto puede ser el aumento en el número de animales criados y/o aumento en su tamaño y peso. El impacto sobre comunidades puede ser el mejoramiento en su calidad de vida y la disminución de enfermedades prevenibles; los impactos y alcances de esta tecnología son infinitos y sus aplicaciones pueden mejorar la calidad de vida de comunidades alejadas de centros urbanos.

Bibliografía

- Abouda, S., Nollet, F., Chaari, A., Essounbouli, N., & Koubaa, Y. (2013). Direct torque control - DTC of induction motor used for piloting a centrifugal pump supplied by a photovoltaic generator. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 7(8), 1110 - 1115. doi:doi.org/10.5281/zenodo.1089096
- Aliyu, M., Hassan, G., Said, S. A., Siddiqui, M. U., Alawami, A., & Elamin, I. M. (2018). A review of solar-powered water pumping systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 87, 61-76. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.010

- Almeida, R., Ledesma, J. R., Carrêlo, I. B., Narvarte, L., Ferrara, G., & Antipodi, L. (2018). A new pump selection method for large-power PV irrigation systems at a variable frequency. *Energy Conversion and Management*, 174, 874-885. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.071>
- Ba, A., Aroudam, E., Chighali, O. E., Hamdoun, O., & Mohamed, M. L. (2018). Performance optimization of the PV pumping system. *Procedia Manufacturing*, 22, 788-795. doi:<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.112>
- Berger, T. (2017). Practical constraints for photovoltaic appliances in rural areas of developing countries: Lessons learnt from monitoring of stand-alone systems in remote health posts of North Gondar Zone, Ethiopia. *Energy for Sustainable Development*, 40, 68-76. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.07.001>
- Bhende, C., & Malla, S. G. (2012). Novel Control of Photovoltaic based Water Pumping System without Energy Storage. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 13(5). doi:DOI: 10.1515/1553-779X.2931
- Biji, G. (2012). Modelling and simulation of PV based pumping system for maximum efficiency. *International Conference on Power, Signals, Controls and Computation*, 1-6. doi:10.1109 / EPSCICON.2012.6175266
- Brandoni, C., & Bošnjaković, B. (2017). HOMER analysis of the water and renewable energy nexus for water-stressed urban areas in Sub-Saharan Africa. *Journal of Cleaner Production*, 155(1), 105-118. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.114>
- Chandel, S., Nagaraju Naik, M., & Chandel, R. (2015). Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. *Renewable*

and *Sustainable Energy Reviews*, 49, 1084-1099. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.083>

Closas, A., & Rap, E. (2017). Solar-based groundwater pumping for irrigation: Sustainability, policies, and limitations. *Energy Policy*, 104, 33-37. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.035>

Cota, A., Foster, R., Gómez Rocha, L., Ross, M., Hanley, C., Gupta, V., . . . Romero, A. (2004). Ten-year reliability assessment of photovoltaic water pumping systems in Mexico. *American solar energy society conference*.

Djoudi Gherbi, A., Hadj Arab, A., & Salhi, H. (2017). Improvement and validation of PV motor-pump model for PV pumping system performance analysis. *Solar Energy*, 144, 310-320. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.042>

Dursun, M., & Özden, S. (2017). Optimization of soil moisture sensor placement for a PV-powered drip irrigation system using a genetic algorithm and artificial neural network. *Electrical Engineering*, 99(1), 407–419. doi:10.1007 / s00202-016-0436-8

Elasaad, H., Bilton, A., Kelley, L., Duayhe, O., & Dubowsky, S. (2015). Field evaluation of a community scale solar powered water purification technology: A case study of a remote Mexican community application. *Desalination*, 375(2), 71-80. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.08.001>

Fedrizzi, M. C., Ribeiro, F., & Zilles, R. (2009). Lessons from field experiences with photovoltaic pumping systems in traditional communities,”. *Energy for Sustainable Development*, 13(1), 64-70. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esd.2009.02.002>

- Fedrizzi, M., Zilles, R., & Noda, H. (2000). PV systems implementation experience in the Brazilian Amazon rain forest. *World Renewable Energy Congress VI*, 875-878.
- Freitas Machado e Silva, M. D., Calijuri, M. L., Ferreira de Sales, F. J., Batalha de Souza, M. H., & Sampaio Lopes, L. (2014). Integration of technologies and alternative sources of water and energy to promote the sustainability of urban landscapes. *Resources, Conservation and Recycling*, 91, 71-81. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.07.016>
- Ghosh, D., Biswas, S., Balaji, S., Das, P. P., Devi, P. S., & Annapurna, K. (2015). A revisit on solar cell: Generation of electricity by harvesting Sunlight. *Science and Culture*, 81(11-12), 337-347. Obtenido de ISSN 0036-8156
- Glasnovic, Z., & Margeta, J. (2007). A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems. *Solar Energy*, 81(7), 904-916. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.11.003>
- Glasnovic, Z., & Margeta, J. (2007). Optimization of Irrigation with Photovoltaic Pumping System. *Water Resources Management*, 21(8), 1277-1297. doi:10.1007/s11269-006-9081-8
- Hadorn, J. C. (2015). *Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings*. Berlín: Ernst & Sohn. doi:10.1002/9783433604830
- Hadwan, M., & Alkholidi, A. (2018). Assessment of factors influencing the sustainable performance of photovoltaic water pumping systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 307-318. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.092>
- Hamidat, A. (1999). Simulation of the performance and cost calculations of the surface pump. *Renewable Energy*, 18(3),

383-392. doi:[https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00011-1)

Jamil, M. (2012). SPV based water pumping system for an academic institution. *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 1(1), 1-7. doi:[10.11648/j.epes.20120101.11](https://doi.org/10.11648/j.epes.20120101.11)

Joong, N., Hong, J., Yang, W., Chan, Y., Ryu, S., Seo, J., & Seok, S. I. (2015). Compositional engineering of perovskite materials for high-performance solar cells. *Nature*, 517, 476 - 480. doi:<https://doi.org/10.1038/nature14133>

Kaldellis, J., Meidanis, E., & Ausili, D. (2011). Experimental energy analysis of a stand-alone photovoltaic-based water pumping installation. *Applied Energy*, 88(12), 4556-4562. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.036>

Karmakar, S. (1999). Chapter 13 Conservation of energy and water, economy and effluent control in pre-treatment processes. *Textile Science and Technology*, 12, 360-394. doi:[https://doi.org/10.1016/S0920-4083\(99\)80014-0](https://doi.org/10.1016/S0920-4083(99)80014-0)

Koner, P. (1993). A review on the diversity of photovoltaic water pumping systems. *RERIC International Energy Journal*, 15(2), 89-110.

Kumar, A., & Kandpal, T. (2007). Potential and cost of CO₂ emissions mitigation by using solar photovoltaic pumps in India. *International Journal of Sustainable Energy*, 26(3), 159-166. doi:<https://doi.org/10.1080/14786450701679332>

López-Luque, R., Reca, J., & Matínez, J. (2015). Optimal design of a standalone direct pumping photovoltaic system for deficit irrigation of olive orchards. *Applied Energy*, 149, 13-23. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.107>

- Mandelli, S., Barbieri, J., Mereu, R., & Colombo, E. (2016). Off-grid systems for rural electrification in developing countries: Definitions, classification and a comprehensive literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1621-1646. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.338>
- Mankbadi, R., & Ayad, S. S. (1988). Small-scale solar pumping: The technology. *Energy Conversion and Management*, 28(2), 171-184. doi:[https://doi.org/10.1016/0196-8904\(88\)90043-X](https://doi.org/10.1016/0196-8904(88)90043-X)
- Meah, K., Fletcher, S., & Ula, S. (2008). Solar photovoltaic water pumping for remote locations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 472-487. doi:10.1016/j.rser.2006.10.008
- Merei, G., Berger, C., & Sauer, D. U. (2013). Optimization of an off-grid hybrid PV–Wind–Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm. *Solar Energy*, 13, 460-473. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.016>
- Muhsen, D., Ghazali, B., Khatib, T. T., & Abdulabbas, T. (2017). Techno-economic study and optimal sizing of a stand-alone photovoltaic water pumping system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 27(9). doi:<https://doi.org/10.1002/etep.2355>
- Nabil, M., Allam, S. M., & Rashad, E. (2013). Performance Improvement of a Photovoltaic Pumping System Using a Synchronous Reluctance Motor. *Electric Power Components and Systems*, 41(4), 447-464. doi:<https://doi.org/10.1080/15325008.2012.749554>
- Narvarte, L., Fernández-Ramos, J., Martínez-Moreno, F., Carrasco, L. M., Almeida, R., & Carrêlo, I. B. (2018). Solutions for adapting photovoltaics to large power irrigation systems for agriculture. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 29, 119-130. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.07.004>

- Narvarte, L., Lorenzo, E., & Aandam, M. (2005). Lessons from a PV pumping programme in south Morocco. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 13(3), 261 - 270. doi:<https://doi.org/10.1002/pip.581>
- Odeh, I., Yohanis, Y. G., & Norton, B. (2006). Economic viability of photovoltaic water pumping systems. *Solar Energy*, 80(7), 850-860. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.05.008>
- Park, N. (2015). Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology. *Materials Today*, 18(2), 65-72. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.07.007>
- Purohit, P., & Kandpal, T. (2005). Solar photovoltaic water pumping in India: a financial evaluation. *Journal International Journal of Ambient Energy*, 26(3), 135-146. doi:<https://doi.org/10.1080/01430750.2005.9674983>
- Qoaidar, L., & Steinbrecht, D. (2010). Photovoltaic systems: A cost competitive option to supply energy to off-grid agricultural communities in arid regions. *Applied Energy*, 87(2), 427-435. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.012>
- Rezae, A., & Gholamian, S. (2013). Technical and financial analysis of photovoltaic water pumping system for gorgan, Iran. *International Journal on Cybernetics & Informatics*, 2(2), 21-31. doi:10.5121 / ijci.2013.2203
- Shahzad, M., Zahid, A., Rashid, T., Rehan, M. A., Ali, M., & Ahmad, M. (2017). Techno-economic feasibility analysis of a solar-biomass off grid system for the electrification of remote rural areas in Pakistan using HOMER software. *Renewable Energy*, 106, 264-273. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.033>

- Spindler, K., Chandwalker, K., & Hahne, E. (1996). Small solar (thermal) water-pumping system. *Solar Energy*, 57(1), 69-76. doi:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(96\)00043-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(96)00043-6)
- Valer, R., Arrifano Manito, A. R., Selles Ribeiro, T., Zilles, R., & Pinho, J. (2017). Issues in PV systems applied to rural electrification in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1033-1043. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.016>
- Wade, N. S., & Short, T. D. (2012). Optimization of a linear actuator for use in a solar powered water pump. *Solar Energy*, 86(3), 867-876. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.12.016>
- Yahyaoui, I. (2017). *Specifications of Photovoltaic Pumping Systems in Agriculture*. Elsevier Science.
- Yeşilata, B., & Firatoglu, A. (2008). Effect of solar radiation correlations on system sizing: PV pumping case. *Renewable Energy*, 33(1), 155-161. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.01.005>
- Zhang, Y., Li, M., Wang, J., Chen, J.-J., & Zhu, Y.-F. (2017). Field tests of pumping-recharge technology for deep confined aquifers and its application to a deep excavation. *Engineering Geology*, 228, 249-259. doi:[10.1016/j.enggeo.2017.08.019](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.08.019)
- Zilles, R., & Fredrizzi, M. C. (1999). Avaliação preliminar dos sistemas fotovoltaicos instalados nas residências dos moradores da Ilha do Cardoso. São Paulo: IEE/USP.

CAPÍTULO 2. CATEGORIZACIÓN TECNOLÓGICA Y COMERCIAL DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS DE DURAZNO DEL MUNICIPIO DE SOTAQUIRA - BOYACÁ

Ángela María González Amarillo

Adriana Granados Comba

Rafael Andrés Ramírez

Saúl Hernández Moreno

2.1 Introducción

De acuerdo con la caracterización y tipificación nacional más reciente de los sistemas de producción de caducifolios como el duraznero (Miranda & Carranza, 2013), se identificó que este cultivo corresponde al principal frutal perenne en el departamento de Boyacá. Sin embargo, la falta de un diseño integral de los cultivos ha limitado su crecimiento, desarrollo (Africano-Pérez *et al.*, 2016; Pinzón *et al.*, 2014) y sostenibilidad (Cancino *et al.*, 2018). Entre los aspectos que están asociados con la baja rentabilidad, se encuentran el uso de tecnologías tradicionales, deficiente manejo fitosanitario, alto costo de insumos, falta de planificación de cosechas, entre otros (Miranda y Carranza, 2013; Virla, 2010). El objetivo de este estudio fue

actualizar el estado del arte relacionado con el grado de diseño y tecnificación del sistema productivo de duraznero mediante la tipificación para la identificación de parámetros promisorios para el desarrollo de planes de transición energética de combustibles fósiles a energía renovable en este caso específico solar fotovoltaica.

2.2 Materiales y métodos

Para la presente investigación se desarrolló un método cuantitativo de estudio aplicado a una población de 30 sistemas productivos de durazno, localizados en el municipio de Sotaquirá en las veredas El Cedro, Moral, Cortadera Chiquita, Río de piedras y Bosiga sur del departamento de Boyacá, que permitió el desarrollo de análisis estadísticos multivariados, los cuales fueron aplicados a los resultados obtenidos mediante recopilación de información primaria con una herramienta tipo encuesta validada mediante la implementación del alfa de Cronbach y panel de expertos, la herramienta inicial contó con un total de 99 parámetros distribuidos en 9 secciones como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de las secciones de la herramienta tipo encuesta, empleada en la investigación.

Sección	Descripción	Número de parámetros
Primera	Información general del encuestador	4
Segunda	Información general del productor	11
Tercera	Características del sistema productivo	14
Cuarta	Grado de tecnificación del cultivo	26
Quinta	Manejo agronómico del cultivo	13
Sexta	Manejo poscosecha	7

Séptima	Comercialización	15
Octava	Problemáticas identificadas	8
Novena	Observaciones	1
Total parámetros de la herramienta		99

Fuente: Autores.

2.2.1 Validación de la herramienta

Para el proceso de validación de la herramienta tipo encuesta se empleó el alfa de Cronbach (Virla, 2010) sumado a validación por expertos (Cleves-Leguízamo y Jarma-Orozco, 2014).

2.2.2 Análisis por componentes principales

Una vez establecidos los parámetros de estudio se determinaron los componentes principales definidos por las variables compuestas o sintéticas, con el fin de correlacionar los parámetros analizados con la varianza acumulada de los datos registrados en la herramienta codificada (Babu y Sanyal, 2009; Cleves-Leguízamo y Jarma-Orozco, 2014; Miranda y Carranza, 2013).

2.2.3 Análisis clúster

Mediante el análisis clúster de naturaleza jerárquica, se realizó la comparación o agrupación que permitió definir los diferentes tipos de sistemas productivos, este procedimiento se desarrolló con el fin de crear tipos altamente homogéneos entre las unidades productivas analizadas y a su vez maximizar la heterogeneidad entre los tipos homogéneos definidos (Marsili-Libelli, 2016; Norton, 1994).

2.2.4 Validación de la herramienta

Para este documento trabajamos con las secciones primera a quinta de la herramienta tipo encuesta. Una vez validado y aplicado el procedimiento para determinación del alfa de Cronbach (Ogasawara, 2016), en el cual se codificaron las variables, construyeron escalas para los parámetros cualitativos y ajustaron los rangos para los parámetros cuantitativos (Miranda y Carranza, 2013). De esta forma se contó con un total de 32 parámetros que permitieron obtener un margen de fiabilidad de la herramienta de 0,800 como se presenta en la Tabla 2 lo que indica que la herramienta empleada tiene una buena fiabilidad (Virla, 2010).

Tabla 2. Estadísticas para alfa de cronbach para el total de parámetros analizados

Alfa de Cronbach		No. de elementos		
,800		32		
Código asignado a la variable	Media de escala	Varianza de escala	Correlación total de elementos corregida	Alfa de Cronbach si el elemento se ha suprimido
SX	55,5667	122,668	-0,128	0,805
VER	54,8667	117,913	0,098	0,805
TTIERR	55,8000	121,890	-0,082	0,802
ARC	55,1667	101,661	0,682	0,774
NAP	55,0333	112,654	0,211	0,803
DEP	55,7333	120,823	0,101	0,800
DES	55,7333	120,823	0,101	0,800
VDDC	54,9667	118,240	0,140	0,801

TDRV	55,2000	115,269	0,260	0,797
NCUC	55,6333	111,757	0,459	0,788
NJCC	54,6000	107,076	0,387	0,792
VJOR	53,4000	117,076	0,253	0,797
CTCU	55,5000	111,086	0,377	0,791
PDCU	54,9667	122,861	-0,181	0,804
FAST	54,8667	104,257	0,621	0,778
CAST	54,9667	107,344	0,660	0,779
FADS	55,2333	107,289	0,729	0,778
FAFO	55,1667	101,385	0,747	0,771
TSRI	55,3667	113,206	0,663	0,787
SRSF	54,9000	122,024	-0,089	0,802
TSBO	54,3667	127,826	-0,390	0,817
AADR	55,0000	124,000	-0,302	0,806
FRAG	55,4333	113,357	0,354	0,793
PPAC	54,7333	104,064	0,492	0,785
RMEF	55,8000	122,303	-0,184	0,802
PEAC	54,5333	96,051	0,598	0,778
RPDC	54,8667	121,982	-0,105	0,802
RMMA	55,7000	120,976	0,065	0,801
PMAC	55,7000	118,424	0,405	0,796
EIDF	55,5667	121,633	-0,025	0,803
TDIF	55,6667	115,126	0,632	0,790
ECFR	55,5000	122,052	-0,065	0,804
TCFR	55,5333	115,775	0,352	0,794

Fuente: Autores.

2.3 Resultados y Discusión

2.3.1 Análisis por componentes principales

Seguidamente se estableció el análisis de varianza para determinar los promedios y desviaciones estándar para los 32 parámetros analizados, con los cuales se construyó la matriz de correlaciones, obteniendo que las interacciones de 10 componentes principales explican la varianza total en un 82,427% como se presenta en la Tabla 3, considerándose como un buen ajuste para el método empleado (Cleves-Leguízamo y Jarma-Orozco, 2014; Miranda & Carranza, 2013).

Tabla 3. Explicación de la varianza total por el método de extracción: análisis de componentes principales.

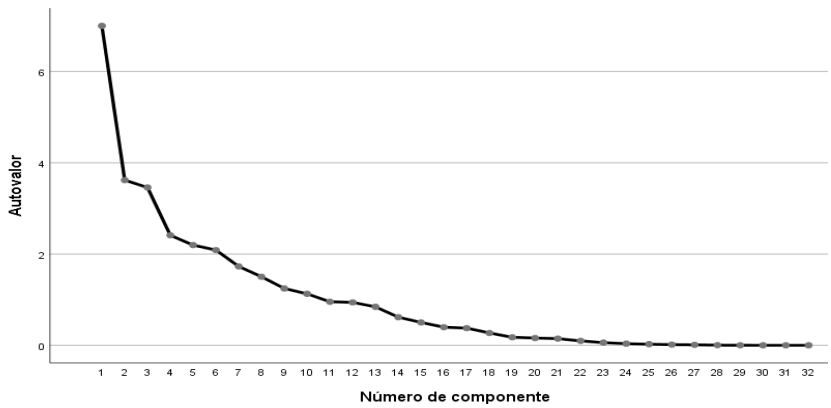
Compo- nente	Auto valores iniciales			Sumas de cargas al cuadrado de la rotación		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	7,000	21,875	21,875	5,148	16,088	16,088
2	3,620	11,312	33,187	3,094	9,670	25,758
3	3,458	10,808	43,995	2,865	8,953	34,711
4	2,411	7,535	51,530	2,812	8,787	43,498
5	2,196	6,863	58,392	2,776	8,676	52,174
6	2,086	6,520	64,912	2,608	8,151	60,326
7	1,729	5,404	70,316	2,154	6,732	67,057
8	1,502	4,692	75,008	1,879	5,871	72,928
9	1,246	3,893	78,901	1,741	5,441	78,369
10	1,128	3,525	82,427	1,298	4,057	82,427
11	0,954	2,982	85,408			
12	0,940	2,938	88,347			
13	0,843	2,635	90,981			
14	0,616	1,925	92,906			

Compo- nente	Auto valores iniciales			Sumas de cargas al cuadrado de la rotación		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
15	0,501	1,566	94,472			
16	0,397	1,241	95,713			
17	0,377	1,177	96,890			
18	0,270	0,844	97,734			
19	0,176	0,549	98,283			
20	0,159	0,497	98,780			
21	0,147	0,460	99,240			
22	0,096	0,300	99,540			
23	0,059	0,184	99,723			
24	0,036	0,113	99,836			
25	0,025	0,078	99,914			
26	0,014	0,044	99,958			
27	0,010	0,032	99,989			
28	0,003	0,009	99,998			
29	0,001	0,002	100,000			
30	5,210E- 17	1,628E- 16	100,000			
31	-2,088E- 17	-6,524E- 17	100,000			
32	-8,760E- 17	-2,737E- 16	100,000			

Fuente: Autores.

De forma adicional se obtuvo el gráfico de sedimentación presentado en la Figura 2, en el cual se ratifican los componentes principales identificados en la Tabla 3.

Figura 2. Gráfico de sedimentación para la identificación de componentes principales.



Fuente: Autores.

Con el fin de identificar los parámetros que conforman cada uno de los 10 componentes principales identificados para los sistemas productivos de durazno, se empleó la matriz de componente rotado y se diferenciaron por colores los parámetros que conforman cada componente como se presenta en la Figura 3.

Figura 3. Matriz de componentes rotados para identificación de parámetros asociados a los componentes.

Matriz de componente rotado ^a										
	Componente									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CAST	,817		,188	,154	,136					,137
FAFO	,786	-,101	,154			,280	,260			-,121
FAST	,764			,149	,245	,204	-,241			,127
PEAC	,737	,150		,128		,188		-,216	,192	-,254
FADS	,725	-,127	,376			,146	,265	-,301	,100	
FRAG	,646		-,241		,525	-,182		,205		
PPAC	,640	,637			-,190		-,121			-,125
TSRI	,541	,462	,446		,214			,336		
RMMA	-,144	,823	-,131	,137		,102	-,205		,130	
VDDC	-,120	,768	,166	,135	-,106			-,115	-,126	
NJCC	,164	,648	,365	-,151	-,128	,214			-,170	,468
TSBO	-,306	,499	-,123	-,417	-,172		,423	-,333	,215	
TDRV		,102	,814	,138	,357		-,185	,130		,109
NAP	,124	,138	,696	-,281	-,136		,168			,110
PDCU	-,164	,256	,674	-,311	,113	,129	,318		-,111	,163
ARC	,378	,166	,589	-,196	,215	,429	,140		-,149	
DES	,107	,144		,922		-,108	,150		,102	
DEP	,107	,144		,922		-,108	,150		,102	
PMAC	,390	-,175		,597	,212	,210	,115	-,530		
CTCU	,297	-,118			,850	,259			-,174	
AADR			-,279	,138	,812				-,356	,111
NCUC	,255	-,149			,720	,535				
TCFR		,121				,893				
TDIF	,289	,118			,281	,855	,102		-,109	
VER				,138			,909	,120		
SX			,129	-,196	-,103	-,226	,647			-,104
RPDC	-,200							,875	,119	
ECFR	-,228	,359	,128	,172	,112	-,266	-,175	,512	,487	
EIDF			-,256	,240		-,140	,134		,774	
VJOR	,424	-,268	,212	-,118				,264	,522	
TTIERR	-,137						,200		-,107	,754
RMEF	-,149					-,154	,323		-,425	-,512

Método de extracción: análisis de componentes principales.

Método de rotación: Varimax con normalización Kaiser.

a. La rotación ha convergido en 11 iteraciones.

De esta forma los componentes 1 al 10 está conformado por los parámetros presentados en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros que conforman los componentes principales 1 a 10.

COMPONENTE	CÓDIGO PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN PARÁMETRO
COMPONENTE 1	CAST	Tipo de asistencia técnica recibida
	FAFO	Frecuencia de los análisis foliares
	FAST	Frecuencia de la asistencia técnica
	PEAC	Principales enfermedades del cultivo
	FADS	Frecuencia de los análisis de suelos
	FRAG	Frecuencia de los análisis de aguas
COMPONENTE 2	PPAC	Principales plagas que afectan el cultivo
	TSRI	Tipo de sistema de riego
	RMMA	Tipo de manejo de malezas
	VDDC	Variedad de durazno cultivada
	NJCC	Número de jornales por ciclo
	TSBO	Movilidad del sistema de bombeo
COMPONENTE 3	TDRV	Tipo de reservorio
	NAP	Número de árboles plantados
	PDCU	Planificación y diseño del cultivo
	ARC	Área del cultivo
COMPONENTE 4	DES	Distancia entre surcos
	DEP	Distancia entre plantas
	PMAC	Principales malezas que afectan el cultivo
COMPONENTE 5	CTCU	Costos totales del cultivo
	AADR	Disponibilidad de distrito de riego
	NCUC	Número de canastillas de la última cosecha

COMPONENTE 6	TCFR	Compensadores de frío empleados
	TDIF	Inductores florales empleados
COMPONENTE 7	VER	Vereda
	SX	Sexo
COMPONENTE 8	RPDC	Realiza programación de cosecha
	ECFR	Emplea compensadores de frío
COMPONENTE 9	EIDF	Emplea inductores de floración
	VJOR	Valor del jornal
COMPONENTE 10	TTIERR	Tenencia tierra
	RMEF	Realiza manejo de enfermedades

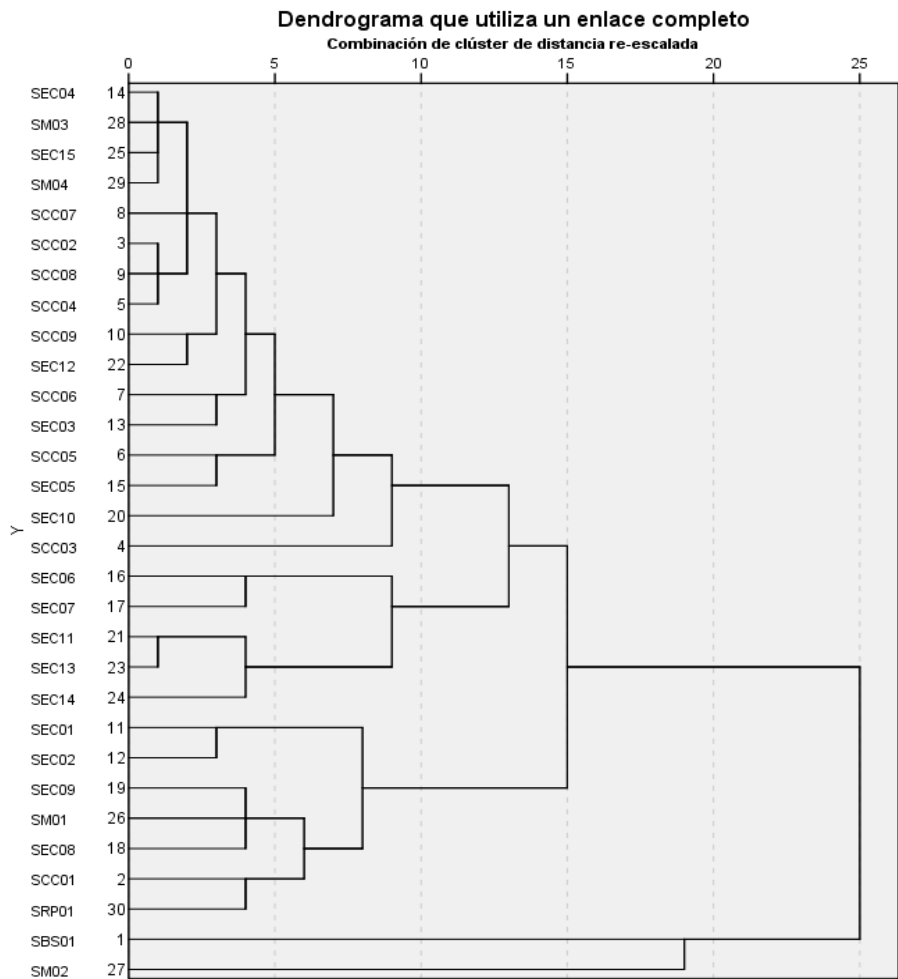
Fuente: Autores.

2.3.2 Resultados del análisis clúster

El grado de similaridad entre los sistemas productivos, se determinó empleando el protocolo preestablecido en el sistema estadístico SPSS mediante la aplicación del concepto de distancia euclidiana de acuerdo con el método de Ward (Cleves-Leguízamo & Jarma-Orozco, 2014; Pérez Almeida *et al.*, 2010), este método indica que a menor distancia entre los sistemas productivos existirá una mayor similitud y de esa forma podrán ser clasificados en un mismo grupo.

Mediante el dendrograma presentado en la Figura 4, se identificaron seis grupos o dominios para los sistemas productivos analizados los cuales se encuentran codificados con letras y números, la primera letra indica el municipio (Sotaquirá: S), la segunda y tercera letra indican la vereda (EC: El Cedro, M: Moral, CC: Cortadera Chiquita, BS: Bosiga Sur y RP: Rio de Piedra, el número hace referencia al consecutivo de la encuesta para la vereda.

Figura 4. Dendrograma con enlace de ward para las combinaciones de clústeres de distancia re-escalada.



Fuente: Autores.

2.3.3 Descripción de los grupos formados

Para la descripción de los grupos formados mediante el análisis clúster, se tuvieron en cuenta las variables semejantes y disimiles de los grupos, es importante mencionar que las agrupaciones que se presentan en este documento no han

sido ajustadas con el proceso de observación en campo de las condiciones de los sistemas productivos (Cleves-Leguízamo y Jarma-Orozco, 2014), proceso que se desarrollará en fases posteriores del proyecto.

2.3.3.1 Sistemas productivos tipo 1

Conformado por 7 sistemas productivos: SEC04, SEC15, SM03, SM04, SCC02, SCC04 y SCC08. Esta clasificación corresponde al 23,3% de los sistemas productivos evaluados y el 42,86% de las unidades productivas están ubicadas en la vereda Cortadera Chiquita. Son predios con una extensión de entre 0,06 a 0,96 ha, cuentan con una asistencia técnica limitada, pero realizan manejos de plagas, enfermedades y malezas, el 71,4% de los productores emplean inductores florales y compensadores de frío mientras que el 85,7% emplean defoliantes, pero no cuentan con sistema de riego, se caracterizan por no realizar análisis de suelos ni foliares.

2.3.3.2 Sistemas productivos tipo 2

Conformado por 5 sistemas productivos: SCC06, SCC07, SCC09, SEC03 y SEC12. Esta clasificación corresponde al 16.7% de los sistemas productivos evaluados. Son predios con un área entre 0,64 y 3,5 ha, el 100% de los productores de este grupo no reciben asistencia técnica, no cuentan con sistema de riego ni acceso a un distrito de riego, el 100% de los productores del grupo realizan programación de cosecha y se caracterizan por realizar manejo de plagas y enfermedades.

2.3.3.3 Sistemas productivos tipo 3

Conformado por 4 sistemas productivos: SEC05, SEC10, SCC03 y SCC05. Esta clasificación corresponde al 13.3% de los sistemas productivos evaluados. Son predios entre 0,16 y 2,0 hectáreas, no cuentan con reservorio de agua, el 75% de los productores del grupo cuentan con asistencia técnica, el 75%

de los productores realizan programación de cosecha, realizan manejos de malezas, enfermedades y plagas.

2.3.3.4 Sistemas productivos tipo 4

Conformado por 5 sistemas productivos: SEC06, SEC07, SEC11, SEC13 y SEC14. Esta clasificación corresponde al 16.7% de los sistemas productivos evaluados y el 100% de las unidades productivas están ubicadas en la vereda El Cedro. El 100% de los productores afirman tenencia propia de la unidad productiva. Son predios con un área entre 0,64 y 4,48 hectáreas, el 75% de los predios cuentan con reservorios de agua, el 40% de los productores cuenta con asistencia técnica, no realizan análisis foliares, el 60% de los sistemas productivos del grupo no cuentan con sistema de riego, el 80% no cuenta con acceso a un distrito de riego, el 100% de los unidades productivas que cuentan con disponibilidad de riego emplean combustibles fósiles para su activación y no realizan análisis de aguas, el 100% de productores emplean inductores florales y defoliantes.

2.3.3.5 Sistemas productivos tipo 5

Conformado por 7 sistemas productivos: SEC01, SEC02, SEC08, SEC09, SM01, SCC01 y SRP01. Esta clasificación corresponde al 23.3% de los sistemas productivos evaluados y el 57,14% de las unidades productivas están ubicadas en la vereda El Cedro. El 100% de los productores afirman tenencia propia de la unidad productiva, la extensión de los terrenos va desde 0,64 hasta 2,0 hectáreas. Solo el 28,6% de los productores del grupo cuentan con reservorio de agua. El 71,42% de los productores cuentan con asistencia técnica privada, tan solo el 42,8% de los productores del grupo afirman realizar análisis de suelos y foliares y el 85,7% de las unidades productivas no cuentan con sistema de riego propio, el 80% de los productores que emplean riego utilizan fuentes convencionales de energía como lo son la gasolina y el ACPM, tan solo el 20% de los productores que utilizan riego emplean fuentes alternativas.

2.3.3.6 Sistemas productivos tipo 6

Conformado por 2 sistemas productivos: SBS01 y SM02. Esta clasificación corresponde al 6.7% de los sistemas productivos evaluados. La extensión sembrada en durazno oscila entre 5,76 y 7 hectáreas, el 100% de los sistemas productivos cuentan con reservorio, realizan análisis de suelos, cuentan con asistencia técnica privada, cuentan con sistema de riego, el 100% emplea combustibles fósiles para la activación del sistema de riego. El 100% realizan manejos de plagas, enfermedades y malezas, sumado a la posibilidad de realizar programación de cosecha mediante el uso de inductores florales, defoliantes y compensadores de frío.

2.3.4 Discusión de los grupos formados

De acuerdo con los resultados obtenidos, se evidenció que el avance tecnológico respecto al diagnóstico presentado por Miranda et al, (2013), no ha tenido un avance significativo. No obstante, se identificó que el 70% de los productores han implementado algún plan de mejora [1] como lo son la programación de cosechas mediado por el uso de inductores florales (56,7%), defoliantes (70%) y uso de compensadores de frío (56,7%) [7]. En cuanto a los sistemas de riego y drenaje se identificó que en el año 2013 el 56,3% de los productores contaban con sistemas de riego (Miranda & Carranza, 2013) siendo predominante el riego con manguera, mientras que para el año 2019 (Puentes et al., 2008) tan solo el 30% de los productores contaban con sistemas de riego, siendo predominante el riego por manguera. Esta situación es justificada en la medida que el 66,7% de los sistemas productivos de la región no cuentan con acceso a distritos de riego y solo el 30% cuentan con acceso a un reservorio de agua.

Con relación a los manejos agronómicos en general se mantienen los insumos empleados con una tendencia en la racionalización y uso de compuestos específicos para manejo

de plagas, enfermedades y malezas. Este tipo de estudios preliminares permitirán a futuro el desarrollo e implementación de herramientas para el diagnóstico como lo son la evaluación de los ciclos de vida energéticos de los cultivos (ELCA) (Pires Gaspar et al., 2018), herramienta que será fundamental en los procesos de transición energética en los sistemas agrícolas a nivel mundial (Campoy et al., 2011; Silva-Laya et al., 2017).

2.4 Conclusiones

En conclusión, se identificó un alto potencial para el desarrollo e inicio de transiciones energéticas en los sistemas productivos en las veredas analizadas del municipio de Sotaquirá, estos procesos cuentan con un buen grado de acogida por parte de los productores y la percepción es favorable por parte de los organismos políticos y administrativos de la región, dada la búsqueda actual para la implementación de diseños con manejos eco sostenibles y energías alternativas con tendencia en la transformación y valorización de frutos especialmente en el desarrollo de conservas como lo son las mermeladas, compotas y dulces (Nanaki, 2018).

Bibliografía

- Africano-Pérez, K. L., Balaguera-López, H. E., Almanza-Merchán, P. J., Cárdenas-Hernández, J. F., & Herrera-Arévalo, A. (2016). Caracterización poscosecha del fruto de durazno [*Prunus persica* (L.) Bastch] cv. Dorado producido bajo condiciones de trópico alto. *Rev. Colomb. Cienc. Hortic. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(2), 232-240.
- Babu, S. C., & Sanyal, P. (2009). Food security, poverty and nutrition policy analysis statistical methods and applications.
- Campoy, J. A., Ruiz, D., Cook, N., Allderman, L., & Egea, J. (2011). Clinal variation of dormancy progression in apricot.

South African Journal of Botany *South African Journal of Botany*, 77(3), 618-630.

Cancino, S. E., Cancino Escalante, G. O., & Quevedo García, E. (2018). Modelo explicativo de la rentabilidad económica del cultivo de durazno en la provincia de Pamplona, Colombia. *Revista Económicas CUC ECONÓMICAS CUC*, 39(2), 63-76.

Cleves-Leguízamo, J.A., & Jarma-Orozco, A. (2014). Characterization and typification of citrus production systems in the department of Meta. *agc Agronomía Colombiana*, 32(1), 113-121.

Marsili-Libelli, S. (2016). *Environmental systems analysis with MATLAB*.

Miranda, D., & Carranza, C. (2013). Caracterización, clasificación y tipificación de los sistemas de producción de caducifolios: ciruelo, duraznero, manzano y peral en zonas productoras de Colombia. In D. F. Miranda, G.; Carranza, C. (Ed.), *Los frutales caducifolios en Colombia: Situación actual, sistemas de cultivo y plan de desarrollo* (pp. 87-114): Soc Col Cienc Hort.

Nanaki, E. A., & Koroneos, C. J. (2018). Sustainable Peach Compote Production: A Life Cycle Thinking Approach. *Sustainability*, 10(11).

Norton, R. D. (1994). Análisis de las políticas para el desarrollo agrícola y alimentario: series de datos básicos y su utilización.

Ogasawara, H. (2016). Approximations to the distribution of the sample coefficient alpha under nonnormality.

Pérez Almeida, I., Vásquez García, S., Pérez, D., & Salazar, E. (2010). Diversidad genética en seis especies de *Passiflora* spp utilizando RAPD.

- Pinzón, E. H., Cruz Morillo, A., & Fischer, G. (2014). Aspectos fisiológicos del duraznero (Prunus pérsica [L.] Batsch) en el trópico alto: Una revisión *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17, 401-411.
- Pires Gaspar, J., Dinis Gaspar, P., Dinho da Silva, P., Simões, M., & Santo, C. (2018). Energy Life-Cycle Assessment of Fruit Products Case Study of Beira Interiors Peach (Portugal). *Sustainability Sustainability*, 10(10), 3530.
- Puentes, G. A., Rodríguez, L. F., & Bermúdez, L. T. (2008). Análisis de grupo de las empresas productoras de frutales caducifolios del departamento de Boyacá. 2008, 26(1), 9.
- Silva-Laya, S. J., Silva-Laya, H. J., & Perez-Martínez, S. (2017). Eficiencia energética y monetaria de sistemas de producción de durazno (Prunus persica) en El Jarillo, Venezuela. *Idesia Idesia*, 35(4), 17-26.
- Virla, M. Q. (2010). Confiabilidad y coeficiente Alpha de Cronbach. *Têlos: Revista de Estudos Interdisciplinares em Ciências Sociais*, 12(2), 248-252.

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO PARA IRRIGACIÓN

Leonardo Cely Güezguán

Edwin Rúa Ramírez

Carlos Andrés Aguirre

Rafael Andrés Ramírez

3.1 Introducción

El abastecimiento de agua surge como una necesidad para la humanidad desde las primeras civilizaciones. La capacidad de llevar agua de un lugar a otro, permite que sean habitables zonas en donde normalmente sería muy difícil hacerlo y también cultivar en zonas áridas donde no hay fuentes naturales de agua.

En la actualidad, existen muchas regiones donde las redes de energía eléctrica no pueden llegar por cuestiones topográficas. Los habitantes de estas zonas deben optar por otras fuentes de energía para el funcionamiento de sus dispositivos. Las bombas hidráulicas, que se utilizan ampliamente para irrigar cultivos, extraer agua de reservorios, pozos, lagos, etc., requieren de un motor para su funcionamiento. Los motores toman la energía desde diferentes fuentes como son: los combustibles fósiles, la energía eólica, la energía solar, entre otras.

Para el caso de la energía solar fotovoltaica; por lo general, se tienen múltiples instalaciones fijas que en muchas ocasiones limitan el alcance del sistema y aumentan los costos. Por lo anterior, se propone la creación de un sistema portátil que permite irrigar diferentes zonas con una única instalación móvil.

El potencial de los sistemas de energía solar fotovoltaica (FV) se ha demostrado en los proyectos de electrificación rural realizados en todo el mundo, en especial el de los sistemas solares domésticos (Yadav, Davies, & Sarkodie, 2019). Es así como crece la importancia económica de estos sistemas, ya que genera una constante baja de sus precios, así como por la experiencia en su aplicación en diferentes sectores, como los servicios sociales y comunales, la agricultura y otras actividades productivas, las cuales tienen repercusiones significativamente en el desarrollo rural (Gustavsson & Ellegård, 2004). De todas formas, hace falta más información del potencial y las limitaciones de esas aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos (van Campen, Guidi, & Best, 2000).

3.2 Diseño de sistemas de tuberías

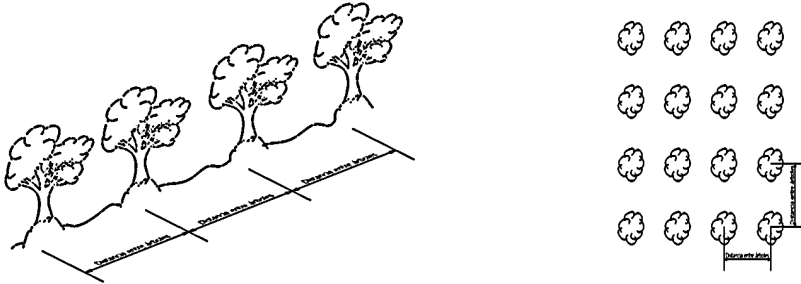
3.2.1 Variables de entrada

Para el diseño de sistemas de tuberías y la selección de la bomba, se deben establecer las variables de entrada mínimas requeridas, que describen cada proyecto en particular. Por lo general, las variables iniciales son:

- La temperatura promedio del agua.
- El flujo volumétrico (caudal). Se obtiene al establecer la cantidad de agua a suministrar por árbol, la cantidad total de árboles, arreglo agronómico (ver Figura 1) y el tiempo de riego (Rua, González, Granados, & Ramírez, 2019).

- Las cotas o alturas de los ramales donde descarga el flujo (condiciones topográficas del terreno).

Figura 1. Distribución de los árboles en función a la distancia entre árboles y el área a cultivar.



Fuente: Autores

Una vez definidas las variables de entrada, se hace un plano hidráulico general, especificando:

- La longitud total de la tubería que conforma la red.
- Las especificaciones y las cantidades de válvulas y accesorios requeridos.

3.2.2 Ecuaciones de diseño

Se plantean las ecuaciones que rigen la red, que en este caso es abierta porque todos los puntos de riego descargan a la atmósfera.

Se cumple que el flujo impulsado por la bomba (Q_b) es la sumatoria de los flujos (Q_i) que descargan a todos los puntos de riego (ecuación de continuidad o ecuación de conservación de la materia para fluidos incompresibles y en régimen estacionario).

$$Q_{bomba} = \sum_{i=1}^n Q_i$$

Se supone que la presión en la tubería principal a la salida de la bomba (p_2), es aproximadamente constante y que cada ramal genera las mismas pérdidas de energía, como lo establecen los sistemas de tuberías en paralelo.

En compensación a que las pérdidas de energía de cada ramal son iguales, independiente de si unos son más largos que otros o si tienen más o menos accesorios, los caudales que van por cada ramal son diferentes. Por los ramales con más accesorios y mayor longitud de tubería va a circular un menor caudal de agua. Para garantizar que el suministro de agua sea igual en todas las plantas, se deben instalar goteros en los extremos de los puntos de descarga.

La presión en la superficie libre del agua (p_1) desde donde se hace la captación es constante y corresponde a la presión atmosférica ($p_1 = \text{cero presiones manométricas}$), la velocidad del agua en el lugar de la captación es cero ($v_1 = 0 \text{ m/s}$), se toma como nivel cero la superficie libre del agua ($z_1 = 0 \text{ m}$), y z_2 es la altura vertical, medida desde la superficie libre del reservorio hasta la línea media de salida de la bomba. Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, se plantea la ecuación general de la energía:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_b - H_l = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

De la ecuación general:

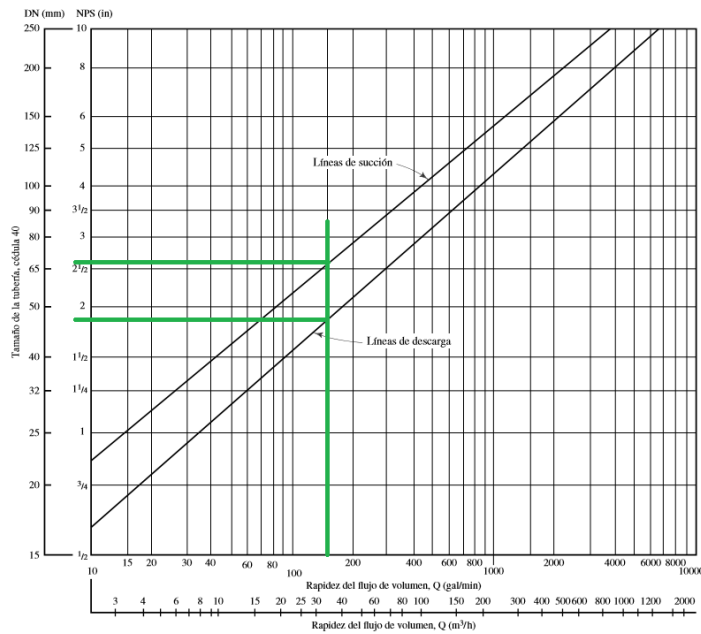
- Los tres primeros términos de la ecuación se reducen a cero.
- Las pérdidas de energía (H_l), corresponden a la tubería de succión y a la tubería principal a la salida de la bomba. Se incluyen las pérdidas menores debidas a accesorios y válvulas.

- La velocidad a la salida de la bomba (v_2), se obtiene a partir del caudal definido en las variables de entrada y el diámetro interno de la tubería sugerido, mediante la siguiente ecuación:

$$v_2 = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi D_2^2}{4}} = \frac{4Q}{\pi D_2^2}$$

Para determinar los diámetros de la tubería de succión y de la tubería de descarga, se utilizan guías como la mostrada en la Figura 2, que ayudan a seleccionar el tamaño más adecuado de tubería, de acuerdo con el caudal que circula.

Figura 2. Ayuda para la selección del tamaño de tubería.



Fuente: (Mott & Untener, 2015)

Por ejemplo, si el caudal es de 150 gal/min, se traza una línea vertical y en los puntos donde corta las líneas diagonales, que corresponden a la línea de descarga y a la línea de succión,

se proyectan horizontalmente dos líneas respectivas hacia la izquierda y se determinan los valores aproximados de los diámetros de las tuberías. Se recomienda seleccionar los diámetros comerciales que más se aproximan; preferiblemente por encima de los volares determinados, porque entre mayor es el área, menor es la velocidad y por la ecuación de Darcy, se nota que las pérdidas de energía son directamente proporcionales al cuadrado de la velocidad.

Ecuación de Darcy:
$$H_l = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

Donde

- H_l Es la pérdida de energía debido a la fricción del fluido con las paredes internas de la tubería.
- f Es el factor de fricción, que depende del número de Reynolds (NR) y de la rugosidad relativa del material de las tuberías.
- L Es la longitud total de la tubería.
- D Es el diámetro interno de la tubería.
- v Es la velocidad promedio del fluido.
- g Es la aceleración de la gravedad.

En resumen, la energía que debe suministrar la bomba (H_{bomba}), se determina de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$H_{bomba} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + H_l$$

Para la determinación de la presión a la salida de la bomba, se plantea el sistema de ecuaciones que gobiernan la red, teniendo en cuenta que todos los puntos del sistema descargan

a la atmósfera; por lo tanto, es una red abierta (como ya se mencionó con anterioridad).

Para solucionar el sistema de ecuaciones que se genera, se utiliza la técnica de Hardy Cross (Giles, Evett, & Liu, 2014) o se emplean programas que se encuentran disponibles en el mercado como Pipe Flow Expert®.

La potencia teórica de la bomba se determina mediante:

$$Potencia_{bomba} = (\rho * g * H_{bomba}) * Q_{bomba}$$

Dónde: ρ es la densidad del agua a la temperatura promedio del lugar, g es la aceleración de la gravedad y Q es el caudal bombeado.

3.2.3 Determinación de la NPSH

Para la determinación del NPSH disponible, se tienen en cuenta cuatro requerimientos:

- La presión atmosférica absoluta del lugar, expresada en columna de agua (h_{sp}), entendida la presión absoluta como la presión medida desde el cero absoluto.
- La distancia vertical de la bomba respecto al reservorio (h_s).
- Las pérdidas totales de energía debidas a la fricción y a los accesorios tales como válvulas, codos, etc. (h_f).
- La presión de vapor absoluta del agua a la temperatura promedio en el reservorio (h_{vp})

$$NPSH = H_{sp} - H_s - H_f - H_{vp}$$

3.2.4 Diseño asistido por computador

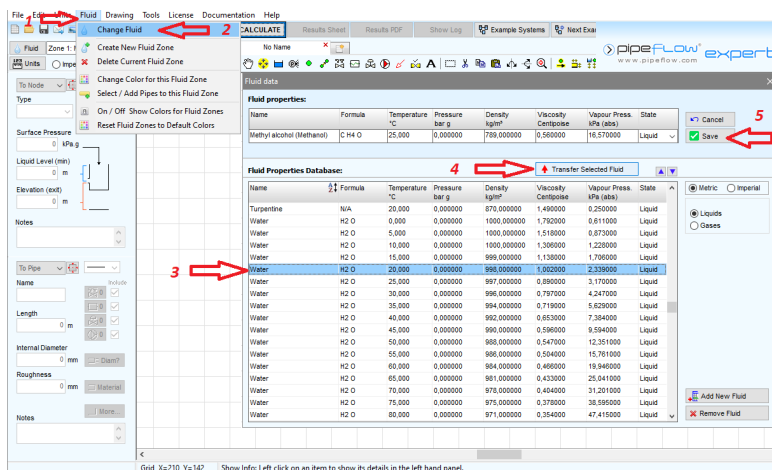
El diseño de sistemas de tuberías asistido por computador tiene un proceso semejante al descrito en los numerales anteriores para la solución analítica, para explicar este proceso de diseño se usara el programa *Pipe Flow Expert® v.7.40*, el cual cuenta con una versión gratuita limitada (Daxesoft Ltd, 2016). Inicialmente se requieren las mismas variables de entrada para ingresar al programa:

3.2.4.1 Temperatura y fluido a usar en el sistema

Los programas disponen de bases de datos con las propiedades de diversos fluidos (líquidos/gases) a diferentes temperaturas. El programa *Pipe Flow Expert®* contiene más de 50 líquidos y las propiedades del agua se encuentran a más de 20 temperaturas diferentes (densidad, viscosidad y presión de vapor), con el objetivo de que la solución numérica sea lo más precisa posible.

Para el diseño del sistema se debe seleccionar el fluido y la temperatura a trabajar como se muestra en la Figura 3, generalmente el fluido es agua líquida a 20 °C.

Figura 3. Selección del fluido a usar en el sistema

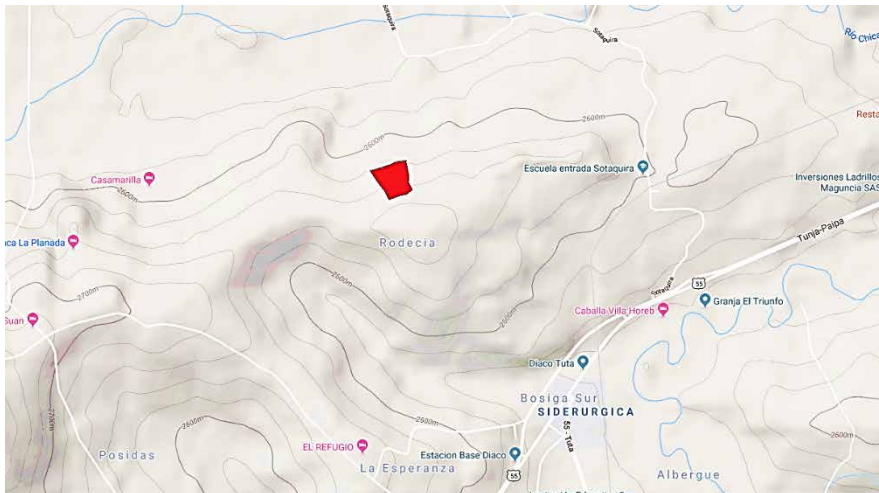


Fuente: Pipe Flow Expert®

3.2.4.2 Esquema y alturas de los ramales de succión y descarga del flujo

Se deben conocer la cota del punto de captación y de descarga, para tal caso es necesario conocer el terreno donde está el cultivo. Entre las herramientas más útiles para conocer estos datos están la ubicación por el sistema de posicionamiento global (GPS) y los mapas de relieve como Google Maps®, en la Figura 4 se presenta una región en rojo, de Sotaquirá (Boyacá-Colombia), donde se tiene cultivos que requieren sistemas de irrigación.

Figura 4. Identificación del área a cultivar y las diferencias de alturas.

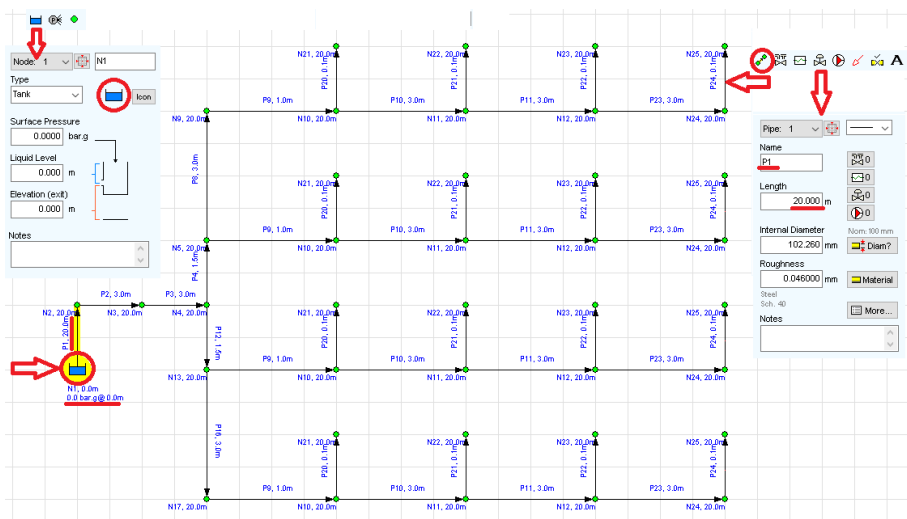


Fuente: Google Maps®.

Conociendo el área a cultivar, la separación entre las plantas, los requerimientos de caudal y tiempo de irrigación, es posible conocer el caudal requerido y se puede generar un esquema del sistema de riego, ubicando el punto de toma de agua, posteriormente los ramales de conexión a la bomba, una

bomba, los ramales de distribución y las válvulas de control de caudal a la salida, como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Esquema de la distribución agronómica en el programa pipe flow expert®.



Fuente: Pipe Flow Expert®

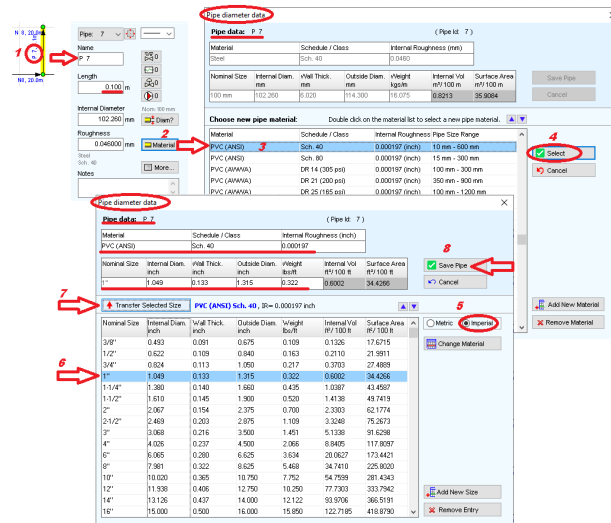
El programa *Pipe Flow Expert*® trabaja a partir de nodos, que van numerados por su orden de posición (N1, N2, N...,) y por tuberías o pipes en inglés, que también van numeradas por su orden de ubicación en el esquema (P1, P2, P...,). En los nodos se ubican Uniones de tuberías, depósitos o salidas como aspersores, en los extremos de las tuberías se pueden ubicar elementos como válvulas, bombas y accesorios.

En las imágenes laterales de la figura 9 es posible observar las demás variables que se pueden controlar con los nodos como presiones, niveles de fluidos y alturas de posición, mientras que en las tuberías se pueden controlar las longitudes, materiales, dimensiones y geometrías de los tubos y accesorios.

3.2.4.3 Selección de accesorios y tuberías

Para la selección de los diámetros de las tuberías de succión y descarga, se usa el caudal requerido para el sistema y el gráfico presentado en la Figura 6. Posteriormente se deben aplicar dichos diámetros al esquema diseñado anteriormente; para tal fin se siguen los pasos descritos a continuación en la Figura 10:

Figura 6. Proceso de selección de tuberías en el programa pipe flow expert®.



Fuente. Pipe Flow Expert®

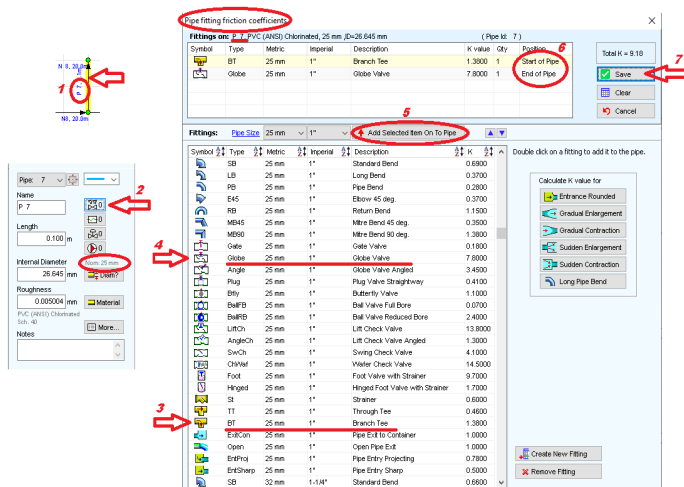
Como se muestra en la figura 10 se deben seleccionar una o varias secciones de tubería en las cuales se requiera modificar su material, como segundo paso se selecciona la opción material del menú lateral y el programa carga una ventana con los materiales y cédulas más comerciales que se trabajan. El tercer paso es seleccionar el material con el que se fabricará el diseño y se elige con el botón seleccionar. Luego de seleccionar el material de la tubería se abre una ventana para escoger el diámetro que debe tener la sección, para esta ventana es importante verificar si la tubería a usar es métrica o en pulgadas para seleccionar la opción adecuada. Como sexto paso se escoge el diámetro que se calculó con la Figura 9 y el

caudal, después se activa el botón transferir tamaño seleccionado y finalmente se salvan las modificaciones realizadas a dicha tubería.

En la mayoría de sistemas se trabajan solo dos diámetros diferentes de tuberías el de succión y el de descarga, por lo tanto, el proceso descrito anteriormente solo debe realizarse dos veces seleccionando todas las secciones que se requieran.

Para seleccionar los accesorios que llevan los ramales del sistema, se debe analizar cada ramal o tubería del sistema para determinar qué accesorios lleva cada una, también es posible realizar este análisis por conjuntos de tuberías con las mismas características de montaje. Como ejemplo se analiza el tubo P7 (semejante a P20, 21, 22, etc., todos aquellos que tengan esta configuración), La Figura 7 presenta el proceso para seleccionar los accesorios de este tramo de tubería y así determinar la pérdida de energía debido a accesorios, la cual se basa en la ecuación de Darcy presentada en la sección 2.2.

Figura 7. Proceso de selección de accesorios en el programa pipe flow expert®.

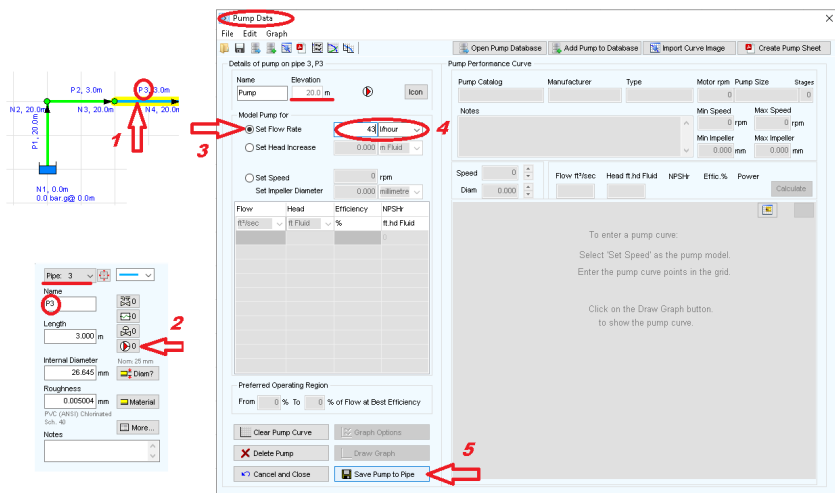


Fuente: Pipe Flow Expert®

El primer paso es seleccionar las tuberías con características semejantes, en este caso solo se seleccionó la tubería P7, luego se selecciona la opción de adicionar o editar accesorios. En la nueva ventana que se carga se deben buscar los accesorios que llevará el tramo de tubería, para el caso de la tubería P7 se selecciona el brazo de una T de 1" de diámetro, y para controlar la salida del fluido por este ramal se selecciona una válvula de bola de 1" totalmente abierta. Los anteriores accesorios se adicionan a la tubería bien sea al inicio o final de ella seleccionando el botón adicionar el ítem seleccionado a la tubería. En la parte superior aparece el coeficiente *K de la sección de tubería y se guarda seleccionando la opción salvar*.

Este proceso se debe hacer con todos los tramos de tubería escogiendo los accesorios particulares de cada una. Un caso particular de este proceso es la ubicación de la bomba en el esquema con el caudal calculado como condición inicial, ya que se adiciona sobre uno de los tramos de tubería como se observa en la Figura 8.

Figura 8. Ubicación de la bomba en el programa pipe flow expert®.



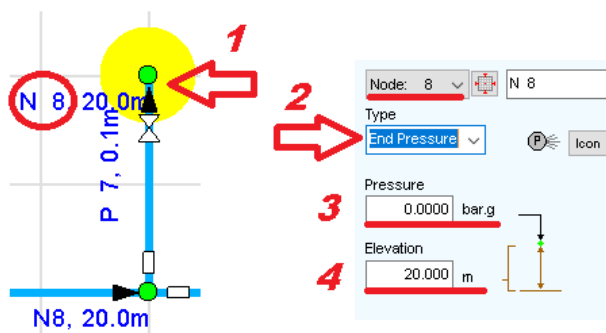
Fuente: Pipe Flow Expert®

Para este caso la bomba debe ir ubicada en la tubería P3, la cual se encuentra a 20 m de altura respecto al punto de succión y en el nodo donde se encuentran las tuberías de succión (mayor diámetro) y descarga (menor diámetro). A continuación, en el menú lateral se selecciona el ícono de adicionar/editar bomba, el cual abre una nueva ventana en la cual se selecciona la opción de establecer el caudal y se digita el valor requerido por el sistema calculado anteriormente. Finalmente se salvan los cambios de la bomba en la tubería.

3.2.4.4 Selección de altura y salidas en nodos

El ajuste del sistema de tuberías finaliza con la determinación de las alturas de los diferentes nodos en función a las características del terreno (variable de entrada) y los nodos donde sale el flujo a la atmósfera (Figura 9).

Figura 9. Selección de nodo con salida al ambiente en el programa pipe flow expert®.



Fuente: Pipe Flow Expert®

Como se presenta en la figura 9, se debe seleccionar el nodo a editar, luego se modifica el tipo de nodo a presión final, para este caso la presión manométrica a la salida es cero y la altura donde está el punto de riego es de 20 m.

Luego de configurar el sistema de tuberías se selecciona la opción calcular y el programa presentará una solución como se muestra en la Figura 10, datos de la tubería P3. Los resultados de esta sección de tubería son relevantes ya que en esta tubería se encuentra la bomba, de tal forma que el sistema requiere de una bomba con requerimientos de caudal (Q_{bomba}) de 0.043 m³/h y de cabeza o energía que la bomba debe suministrar al fluido (H_{bomba}) 5 m, con estos datos se puede seleccionar la bomba.

Figura 10. Resultados tubería p3 del programa pipe flow expert®.

Pipe 3 (P3)
 Flow = 0.043 m³/hour
 Mass Flow = 0.0119 kg/sec
 Velocity = 0.021 m/sec
 Length = 3.000 m
 Inner Diam = 26.645 mm
 Start Elevation = 20.000 m
 End Elevation = 20.000 m
 Start Pressure = -0.4894 bar.g
 End Pressure = 0.0000 bar.g
 Total dP Loss = -5.001 m.hd
 Elevation Change = 0.000 m
 Elevation Change Loss = 0.000 m.hd
 Friction Loss = 0.000 m.hd
 Fitting Loss = none
 Pump Suction = -0.4894 bar.g
 Pump Discharge = 0.0000 bar.g
 Pump Head = 5.001 m.hd
 Pump NPSHa = 5.107 m.hd

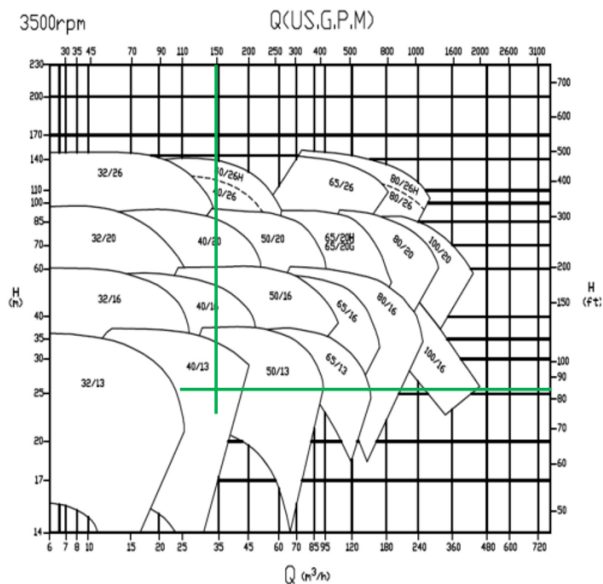
Fuente: Pipe Flow Expert®

3.3 Selección de la bomba

La selección de una bomba para un sistema solar fotovoltaico depende del requerimiento de agua, la altura para elevar el agua (cabeza) y la calidad del agua, por esta razón se debe seleccionar una bomba óptima que cumpla con los requisitos diarios de flujo y cabezal de bombeo. Para esta selección se hace una búsqueda en catálogos disponibles en el mercado local, que cumpla con los requerimientos de caudal Q_{bomba} y de cabeza o energía que la bomba debe suministrar al fluido H_{bomba} . A manera de ejemplo, suponer que $Q_{bomba} = 150$ GPM (galones por minuto) y que $H_{bomba} = 85.5$ ft, en el siguiente catálogo se puede establecer

que la bomba más adecuada para los requerimientos es la 40-13-3500 (ver Figura 11).

Figura 11. Curvas de trabajo bombas centrífugas euro-pump 3500



Fuente: Euro-Pump (2019)

Una vez seleccionada la bomba, se desarrolla la curva de resistencia del sistema diseñado y se compara con la curva de rendimiento de la bomba proporcionada por el fabricante. El punto donde cortan las dos curvas es el punto de operación de la bomba. Nuevamente como ejemplo, se toman los datos de la siguiente Tabla 1 y se superponen las curvas obtenidas (Figura 12).

Tabla 1. Qbomba versus hbomba

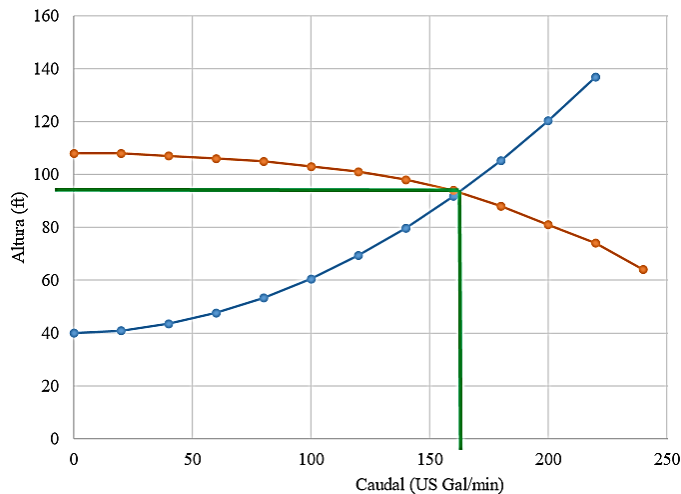
Q[Gal/min]	hd
0	40
20	40,9

40	43,5
60	47,6
80	53,3
100	60,5
120	69,4
140	79,7
160	91,7
180	105,2
200	120,3
220	139,9
240	
150	85,5

Fuente: Autores

La Figura 12 muestra que en el punto de operación el caudal es aproximadamente de 162 gal/min y la cabeza de la bomba es de 95 ft, resultados que cumplen con los requeridos para el ejemplo.

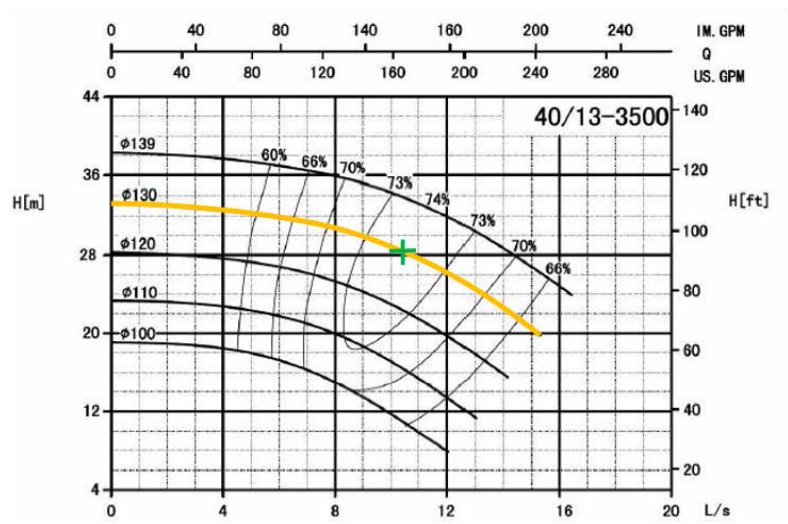
Figura 12. Curva de resistencia del sistema versus curva de rendimiento de la bomba.



Fuente. Autores

La eficiencia de este diseño es del 74% aproximadamente, como se presenta en las curvas de eficiencia de la bomba seleccionada (ver figura 13).

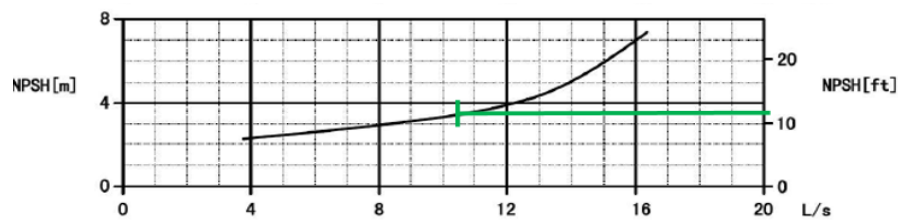
Figura 13. Eficiencia de la bomba en el punto de operación.



Fuente. Euro-Pump (2019)

El NPSH requerido por el fabricante es de aproximadamente 12 ft, de acuerdo con el caudal obtenido en el punto de funcionamiento del sistema (ver Figura 14).

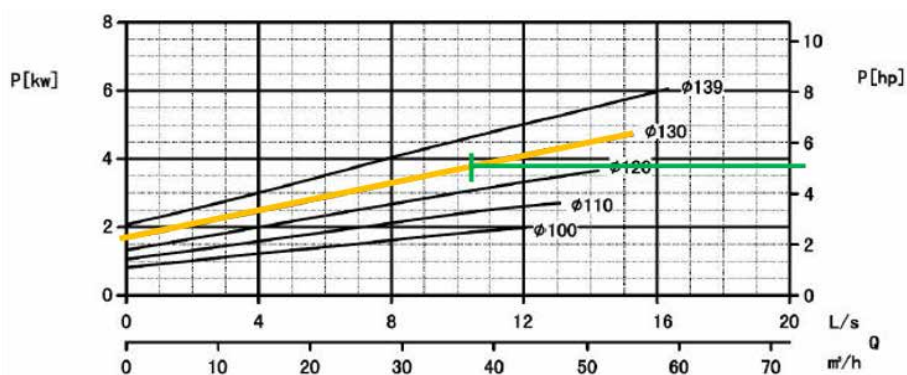
Figura 14. Npsh requerido por el fabricante.



Fuente: Euro-Pump (2019)

Finalmente se determina la potencia requerida por la bomba, teniendo en cuenta el caudal en el punto de operación y el diámetro del rodete de la bomba, para este caso corresponde a un valor aproximado de 5 hp (ver Figura 15).

Figura 15. Potencia requerida para la bomba seleccionada.



Fuente. Euro-Pump (2019)

3.4 Dimensionamiento solar fotovoltaico

Con la bomba seleccionada se realiza el dimensionamiento solar fotovoltaico para seleccionar los componentes que generan la electricidad de la bomba (Rua, González, Granados, & Ramírez, 2019) la potencia de la bomba es la energía que deben suplir las baterías y estas se deben alimentar a través de la energía emitida por los paneles solares fotovoltaicos.

El sistema de bombeo solar fotovoltaico consta de una unidad para bombeo, un motor eléctrico de corriente continua (CC) o corriente alterna (CA), el control eléctrico, y el sistema solar fotovoltaico autónomo. Se pueden utilizar muchos tipos de arreglos de bomba con sistemas fotovoltaicos, una bomba centrífuga se puede acoplar a un motor eléctrico DC o AC horizontal, una bomba de turbina se puede acoplar a un motor de CC vertical, sin embargo, la bomba sumergible es más adecuada

para el sistema solar fotovoltaico. La disposición elimina cualquier tipo de tubo de succión y válvula de pie y da como resultado una unidad de bombeo más eficiente. La potencia de salida del sistema varía en proporción directa a la cantidad de energía solar fotovoltaica (Mukherjee & Sengupta , 2020).

3.5 Tipos de bombas usadas con energía solar fotovoltaica

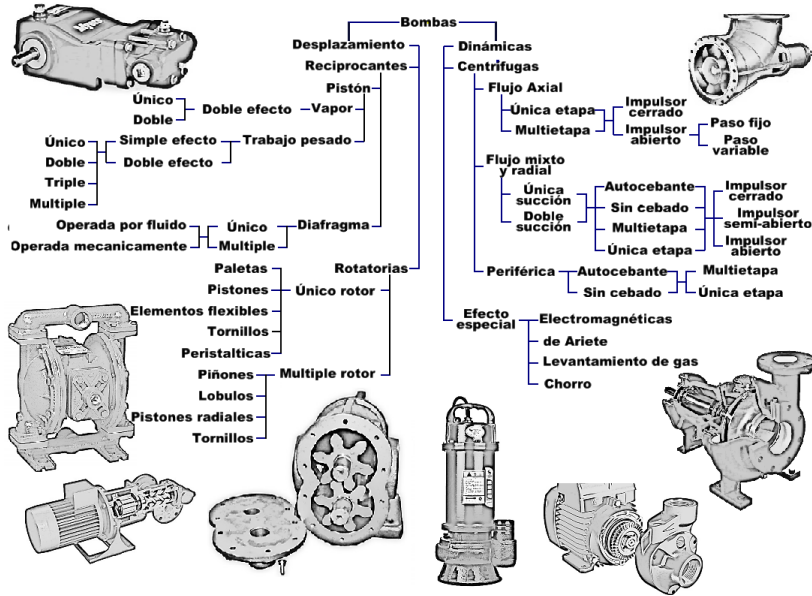
En el diseño de sistemas de bombeo fotovoltaicos es necesario conocer los diversos tipos de bombas que existen en el mercado, recomendaciones para su selección, sus ventajas y desventajas, con este enfoque esta sección busca facilitar el diseño de estos sistemas.

3.5.1 Clasificación general de las bombas

La variedad de bombas que existen en la actualidad es efecto de la gran diversidad de aplicaciones y la importancia que esta máquina tiene para el desarrollo tecnológico de la humanidad, no en vano es la segunda máquina más fabricada en la historia de la humanidad, solo superada por el motor eléctrico (Karassik, Messina, Cooper, & Heald, 2001). La Figura 16 presenta una clasificación general resumida de las bombas más usadas actualmente.

Las bombas de desplazamiento funcionan presionando el volumen de un fluido desde la succión hasta la descarga, mientras que las dinámicas desarrollan altas velocidades y presiones que se transmiten al fluido. Generalmente las bombas de desplazamiento son más grandes y presentan mayores eficiencias que las dinámicas, también estas últimas requieren menos mantenimiento (Chandel, Nagaraju Naik, & Chandel, 2015).

Figura 16. Clasificación general de las bombas



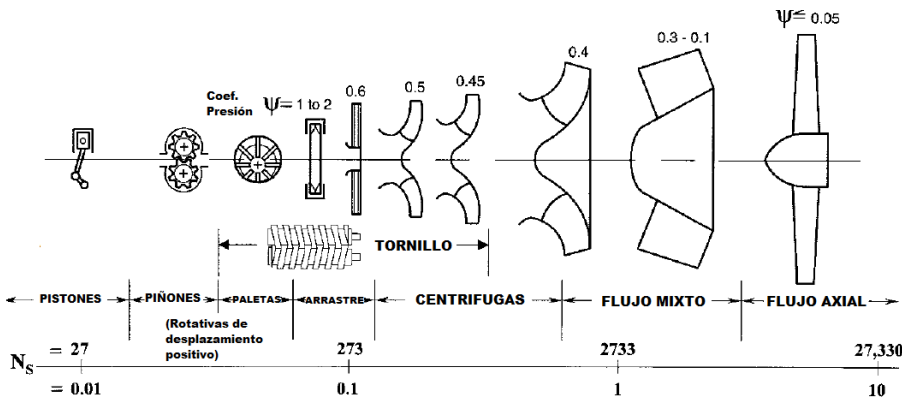
Fuente. Autores

Después de revisar de manera general los diversos tipos de bombas en relación a su geometría y principio de funcionamiento, se presenta una guía para escoger el tipo de bomba más adecuado en función de los requerimientos del sistema y su rendimiento. La forma más habitual de expresar el rendimiento particular de una bomba es determinar su caudal, cabeza de descarga (energía) y velocidad de rotación, pero para comparar si una bomba presenta un mejor rendimiento que otra es recomendable usar solo un término, entre los términos más convenientes para describir el rendimiento de las bombas está la velocidad específica (NS). *Esta velocidad específica normalmente se define como la velocidad a la que operaría un rotor si se redujera proporcionalmente su tamaño para entregar una unidad de caudal contra una unidad de altura total* (Pollak, 1980), como se presenta en la siguiente ecuación.

$$N_s = N[\text{rev/min}] \frac{Q[\text{m}^3/\text{s}]^{1/2}}{H[\text{m}]^{5/4}}$$

En la figura 16 se presenta la comparación de las diferentes geometrías de rotores, donde estas geometrías muestran que una máquina de flujo axial, ya sea una bomba, turbina o compresor, es más eficiente a altas velocidades específicas (alto caudal, baja carga) mientras que una máquina radial, que utiliza el efecto centrífugo, es más eficiente en bajas velocidades específicas (bajo caudal, alta carga) (Brennen, 1994).

Figura 17. Velocidad específica para diversas geometrías de rotores.



Fuente: Karlsen y Aggidis (2016)

Fuera del rango de N_s presentado en la figura 17 para cada tipo de rotor, la eficiencia cae considerablemente en comparación con la que se puede lograr con la configuración que se muestra para cada N_s .

Las máquinas rotativas de desplazamiento positivo, como las bombas de paletas, las bombas de piñones y una variedad de configuraciones de bombas de tornillo, son más apropiadas para los valores más bajos de N_s , el valor de velocidad específica más bajos que requieren bombas de desplazamiento positivo son de pistón.

3.5.2 Bombas de agua solares

Las bombas que se usan en los sistemas de bombeo sustentados por energía solar fotovoltaica se clasifican según el voltaje suministrado, requieren de múltiples accesorios para garantizar su óptimo funcionamiento y son fabricadas principalmente en acero inoxidable o bronce para evitar la corrosión y reducir los tiempos de mantenimiento. Según su aplicación y montaje las clasifican en sumergibles (pozos profundos), flotantes (variación de altura de trabajo) y de superficie (pozos poco profundos) (Chandel, Nagaraju Naik, & Chandel, 2015), entre estas se tienen bombas de desplazamiento y dinámicas.

3.5.3 Bombas Centrífugas

La bomba centrífuga funciona conduciendo el fluido hacia el cubo del impulsor y se lanza hacia la periferia del impulsor mediante la fuerza centrífuga, luego es redirigido el fluido por la carcasa o voluta (GRUNDFOS Pumps Corporation, 2008). Este tipo de bombas son adecuadas en áreas donde el nivel del agua está dentro de los 7 m por debajo del nivel del suelo, normalmente se coloca en el piso superior. La bomba se usa para bombear agua de pozos poco profundos, embalses, lagos y canales. La bomba solar es accionada por un motor DC conectado directamente a una serie de paneles solares, estas bombas se usan para bajas alturas de presión cuando están conectadas directamente a los paneles ya que su eficiencia es óptima solo con alta radiación solar, fuera de este punto su eficiencia disminuye considerablemente.

3.5.4 Bombas sumergibles

Este tipo de bombas se instala bajo el agua. Las bombas consisten en un motor eléctrico y todo se combina en una sola unidad. La forma de la bomba parece un cilindro largo que

puede caber dentro de la carcasa de cualquier pozo. Aunque todo sumergible. Las bombas se pueden instalar en un pozo, mientras que muchas de ellas también se pueden colocar dentro de un lago o corriente.

3.5.5 Bombas de turbina

Básicamente es una bomba centrífuga montada bajo el agua y unida por un eje a un motor montado sobre el agua. El eje se extiende al centro de un gran tubo. Estas son muy eficientes y se usan ampliamente para aplicaciones de gran capacidad. A veces se instalan varias etapas donde cada etapa es esencialmente una bomba apilada encima de otra debajo de ella. Funciona como un motor múltiple entrenar.

3.5.6 Bomba de tornillo y pistón

En una bomba de tornillo, un tornillo atrapa agua en el lado de succión de la carcasa de la bomba y la obliga a salir por el lado de descarga reduciendo su volumen entre más cerca está de dicho punto. En una bomba de pistón, el movimiento del pistón hacia atrás atrae el fluido al cilindro utilizando la válvula de entrada y lo expulsa hacia la salida utilizando la válvula de salida cuando vuelve a su posición inicial. En comparación las bombas de pistón son mucho más complejas que las de tornillo, ya que cuentan con muchas piezas móviles y requieren lubricación con aceite dentro de la bomba, lo que incrementa el riesgo de contaminación del fluido bombeado.

Estas bombas de desplazamiento tienen diferentes características de velocidad-par y no son recomendadas para conectarse directamente a los paneles fotovoltaicos, pues requieren de una unidad de acondicionamiento de potencia y un sistema de seguimiento, con el fin de que se tenga el máximo de energía siempre disponible para la bomba. Se recomiendan en aplicaciones de bajo voltaje (24–48 V) con bajos caudales

diarios (hasta 5 m³/día) y para elevaciones de hasta 150 m con máx. 2 m³/día (Chandel , Nagaraju Naik, & Chandel, 2015).

Bibliografía

Rua, E., González, A., Granados, A., & Ramírez, R. (2019). Diseño estructural de transporte para sistema de bombeo portátil activado con energía solar fotovoltaica para el departamento de Boyacá. *Revista ambiental agua, aire y suelo*, 9 (2).

Brennen, C. E. (1994). *Hydrodynamics of Pumps*. Oxford: Concepts ETI, Inc. & Oxford University Press.

Chandel , S., Nagaraju Naik, M., & Chandel, R. (2015). Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1084-1099.

Daxesoft Ltd. (2016). *Pipe Flow Expert User Guide*. United Kingdom.

Euro-Pump. (15 de 12 de 2019). *Bombas Centrífugas Industriales DIN 24255*. Obtenido de: <http://www.euro-pump.com/>: <https://www.bombasbeyond.com.co/wp-content/uploads/2015/01/CATALOGO-EURO-PUMP-BA.pdf>

Euro-Pump. (5 de 10 de 2019). *Curvas de desempeño 60 HZ Serie BA*. Obtenido de Bombas Beyond: http://www.euro-pump.com/Catalogos/CURVAS_3500.pdf

Giles, R. V., Evett, J. B., & Liu, C. (2014). *Schaum's Outline of Theory and Problems of Fluid Mechanics and Hydraulics, Fourth Edition*. New York: McGraw-Hill Education.

GRUNDFOS Pumps Corporation. (2008). *GRUNDFOS PUMP HANDBOOK*. Olathe.

Gustavsson, M., & Ellegård, A. (2004). The impact of solar home systems on rural livelihoods. Experiences from the Nyimba Energy Service Company in Zambia. *Renewable Energy*, 29, 1059-1072.

Karassik, I., Messina, J., Cooper, P., & Heald, C. (2001). *Handbook Pump*. New York: McGraw-Hill.

Karlsen-Davies, N., & Aggidis, G. (2016). Regenerative liquid ring pumps review and advances on design and performance. *Applied Energy*, 164, 815-825. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.041>

Mott, R., & Untener, J. (2015). *Mecánica de Fluidos* (7a. Edición ed.). México: PEARSON EDUCACIÓN.

Mukherjee , P., & Sengupta , T. (2020). Design and Fabrication of Solar-Powered Water Pumping Unit for Irrigation System. En K. Maharatna , M. Kanjilal , S. Konar , S. Nandi , & K. Das, *Computational Advancement in Communication Circuits and Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering* (Vol. 575, págs. 89-102). Singapore: Springer.

Pollak, F. (1980). *Pump Users' Handbook*. Houston: Gulf Publishing Company.

van Campen, B., Guidi , D., & Best, G. (2000). Energía solar fotovoltaica para la agricultura y el desarrollo rural sostenibles. *Documento de Trabajo sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales, FAO*, pág. 92.

Yadav, P., Davies, P. J., & Sarkodie, S. A. (2019). The prospects of decentralised solar energy home systems in rural communities: User experience, determinants, and impact of free solar power on the energy poverty cycle. *Energy Strategy Reviews*, 26(100424), 14.

CAPÍTULO 4. DIMENSIONAMIENTO SOLAR FOTOVOLTAICO, FUNDAMENTOS Y APLICACIONES

Edwin Rúa Ramírez

Leonardo Cely Güezguán

Adriana Granados Comba

Saúl Andrés Hernández Moreno

Joaquín Alberto Mancipe Saavedra

4.1 Conceptos básicos

4.1.1 La Energía

Probablemente alguna vez ha observado la caída al suelo de un vaso de cristal, y lo que ocurría desde el momento del impacto. De un acto como estos surge el concepto de energía, que es la capacidad de un cuerpo para realizar un trabajo, ya que al impactar el suelo la mayoría de los cristales salieron expulsados en todas direcciones girando sobre sí mismos a gran velocidad.

La energía se puede transformar en diferentes tipos (ver Tabla 1), algunas de las transformaciones más simples:

Tabla 1. Tipos de energía

Tipo de Energía	Descripción
Mecánica	Es la energía que poseen los cuerpos debido a su movimiento. Este tipo de energía puede ser potencial y cinética. La primera es la que tienen los cuerpos debido a su posición, y la segunda la que tienen debido a su velocidad (Machado y Martínez, 1994).
Térmica	Es la energía que posee un cuerpo en virtud a la cantidad de calor que puede absorber o ceder. Así cuando calentamos agua, le estamos transfiriendo energía térmica (Oliver et al., 2012).
Química	Es la energía que posee un cuerpo debido a su estructura interna, tal como la molecular, atómica o nuclear. Dos ejemplos de este tipo de energía es cuando se quema carbón y se extrae la energía que enlaza unos átomos con otros; o la de energía que acumulan las pilas.
Luminosa	Es la que se transmite por medio de ondas. Un caso particular es la energía luminosa emitida del sol (Marín, 2008).
Eléctrica	Es la que poseen las cargas eléctricas en movimiento. Debido a su capacidad para transformarse en otras formas de energía, es la adecuada en muchas máquinas (Kosow, 1991).
Nuclear	Está contenida en los núcleos de los átomos (Rincón, 2014).

Fuente: Elaboración de Autores, con base en referencias.

Para utilizar cualquier forma de energía, se debe hallar un fenómeno natural o crear un sistema artificial que tenga la tecnología adecuada para poder utilizar dicha energía (ver Tabla 2).

Tabla 2. Fuentes de energía

Fuentes de Energía	Forma de energía que contiene
Petróleo, gas natural o carbón	Energía química, es la que se libera por combustión, es decir quemándola.
Uranio 235	Energía nuclear, la cual es almacenada en los núcleos de los átomos de unario 235.
Eólica	Energía mecánica cinética, que se caracteriza porque es la que posee el viento.
Solar	Energía luminosa la cual posee la luz del sol.
Biomasa	Energía química que poseen las sustancias orgánicas como la madera, restos de poda, biocombustibles, entre otros.
Hidráulica	Energía mecánica almacenada en el agua de un embalse.
Geotérmica	Energía térmica que se encuentra acumulada al interior de la corteza de la tierra.

Fuente: Elaboración de Autores

4.1.2 Instituciones de generación, distribución y comercialización de energía en Colombia

El sector energético colombiano está conformado por distintas entidades y empresas que cumplen diversas funciones en los mercados de generación, transmisión, comercialización y distribución de energía. A continuación presentamos algunos términos que pueden facilitar el conocimiento del sector y algunas de las entidades que lo conforman (Grupo de Energía de Bogotá, 2019).

El marco regulatorio del sector eléctrico clasifica las actividades que desarrollan los agentes para la prestación del

servicio de electricidad en: generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica (Grupo de Energía de Bogotá, 2019).

Teniendo en cuenta las características de cada una de las actividades o negocios, se estableció como lineamiento general para el desarrollo del marco regulatorio, la creación e implementación de reglas que permitieran y propendieran por la libre competencia en los negocios de generación y comercialización de electricidad, en tanto que la directriz para los negocios de transmisión y distribución se orientó al tratamiento de dichas actividades como monopolios, buscando en todo caso condiciones de competencia donde esta fuera posible (Grupo energía Bogotá, 2019).

Algunas entidades que conforman el sector energético son (ver Tabla 3):

Tabla 3. Entidades que conforman el sector energético

Entidades	Funciones con relación a las empresas de servicios públicos
Ministerio de Minas y Energía (MME)	Establecer los requisitos técnicos que deben cumplir las empresas. Elaborar planes de expansión de la cobertura del servicio público. Identificar el monto de los subsidios para el respectivo servicio público. Recoger información sobre las nuevas tecnologías y sistemas de administración en el sector. Impulsar las negociaciones internacionales relacionadas con el servicio público pertinente. Desarrollar y mantener un sistema adecuado de información sectorial, para el uso de las autoridades y del público en general (Ministerio de Minas y Energía, 2019).

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)	Es una Unidad Administrativa Especial adscrita al Ministerio de Minas y Energía. Tiene como función el establecimiento de los requerimientos energéticos de la población y los agentes económicos del país, basándose en proyecciones, que toman en cuenta la evolución de las variables demográficas, económicas y de precios de los recursos energéticos, con el fin de elaborar el Plan Energético Nacional y el Plan de Expansión del Sector Eléctrico, en concordancia con el Plan Nacional de Desarrollo (Unidad de Planeación Minero Energética, 2019).
Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG)	Es una Unidad Administrativa Especial del Ministerio de Minas y Energía, la cual está integrada por el Ministro de Minas y Energía, el ministro de Hacienda y Crédito Público, el director del Departamento Nacional de Planeación, cinco expertos en asuntos energéticos y el superintendente de Servicios Públicos Domiciliarios (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2019).
Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD)	Es un organismo de carácter técnico, adscrito al Ministerio de Desarrollo Económico, con personería jurídica, autonomía administrativa y patrimonial. Tiene como funciones específicas el control y vigilancia, ejerciendo en completa independencia de las Comisiones de Servicios y con la colaboración de los superintendentes delegados (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2019).
Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales (ASIC)	Se encarga del registro de los contratos de energía a largo plazo, así como de la liquidación, facturación, cobro y pago del valor de los contratos de energía en la bolsa por generadores y comercializadores. También tiene como función el mantenimiento de los sistemas de información y programas de computación requeridos y del cumplimiento de las tareas necesarias para el funcionamiento adecuado del Sistema de Intercambios Comerciales (SIC) (Resolución 055, 1994).

Liquidador y Administrador de Cuentas (LAC)	Es la encargada de liquidar y facturar los cargos de uso de las redes del Sistema Interconectado Nacional, así como de determinar el ingreso regulado a los transportadores, y de administrar las cuentas por concepto del uso de las redes (Resolución 008, 2003).
Centro Nacional de Despacho (CND)	Es la encargada de la planeación, supervisión y control de la operación integrada de los recursos de generación, interconexión y transmisión del Sistema Interconectado Nacional. A su vez se encarga de dar las instrucciones a los centros regionales de despacho para coordinar las maniobras de las instalaciones, y que de esta manera se hagan operaciones seguras, confiables y ceñidas al reglamento de operación (Resolución 055, 1994).
Consejo Nacional de Operación (CNO)	Organismo que tiene como función principal acordar los aspectos técnicos para garantizar que la operación integrada del Sistema Interconectado Nacional sea segura, confiable y económica y ser el órgano ejecutor del reglamento de operación (Resolución 079, 1999).
Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no interconectadas (IPSE)	Atiende principalmente las necesidades energéticas de los habitantes que no cuentan con este servicio; a su vez es el encargado de hacer la identificación, implementación y monitoreo a soluciones energéticas sostenibles, como el uso de las energías renovables, bajo los criterios de eficacia, eficiencia y efectividad, y de esta manera, mejorando las condiciones de vida de sus pobladores (Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no interconectadas, 2019).

Fuente: Elaboración de Autores

4.1.3 Radiación solar

El Sol es la fuente principal de vida en nuestro planeta, la cual puede satisfacer todas nuestras necesidades, lo cual indica que, si aprendemos cómo aprovechar de forma racional, puesto que la cantidad de energía que el Sol vierte diariamente sobre la Tierra es diez mil veces mayor que la que se consume al día en todo el planeta. En este sentido, Colombia está altamente favorecida debido a su ubicación geográfica y situación climática para aprovechar este tipo de energía (Pardos, 2002).

A su paso por la atmósfera, la radiación solar es sometida a una combinación de procesos de reflexión, atenuación y difusión que alteran sus características. En las nubes, la reflexión produce disminución de la radiación, incidiendo en la superficie terrestre, mientras que la absorción por vapor de agua, ozono y CO₂ modifica las características espectrales de la radiación. La dispersión por partículas genera modificaciones en la distribución espacial de la radiación. Es decir que dependiendo del tamaño de la partícula en interacción se pueden distinguir tres fenómenos de difusión (Perpiñan, 2012):

1. Difusión de Rayleigh, donde la longitud de onda es mucho mayor que el tamaño de la partícula, la cual se produce en las capas altas y es la que da el color azul del cielo.
2. Difusión de Mie, donde es de magnitud similar el tamaño de la partícula a la longitud de onda, las cuales se producen en las capas bajas de la atmósfera.
3. Difusión no selectiva, refiriéndose a aquella en la que la longitud de onda es mucho menor que el tamaño de la partícula.

Este factor de la energía solar, también se conoce como Insolación; y corresponde al valor acumulado de la Irradiancia en un tiempo dado que puede ser horaria, diaria, estacional o anual. Si el tiempo se mide en horas (h) y la Irradiancia se mide en (W/m^2). Entonces la radiación solar se expresa en Wh/m^2 por día, KWh/m^2 por día, o también se expresa en términos de horas solares pico. Una hora solar pico es equivalente a la energía recibida durante una hora, a una Irradiancia promedio de $1,000 \text{ W}/\text{m}^2$. Por lo tanto, una hora de luz solar plena equivale a $1 \text{ kWh}/\text{m}^2$ de energía (Benavides et al., 2017)

“Los datos de radiación disponibles en bases de datos proceden de medidas realizadas por estaciones terrestres o estimadas a partir de imágenes de satélite. Las estaciones terrestres suelen ser estaciones agroclimáticas dedicadas a la medida de variables meteorológicas y climáticas orientadas principalmente al sector agrícola. Uno de los instrumentos que incorporan es el piranómetro, dispositivo capaz de medir la radiación global. En casos excepcionales incluyen un pirheliómetro, dispositivo que mide la radiación directa, o un piranómetro de difusa”. (Perpiñan, 2012, pág. 29)

La información recogida por las redes de estaciones agroclimáticas suele estar disponible para Colombia en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

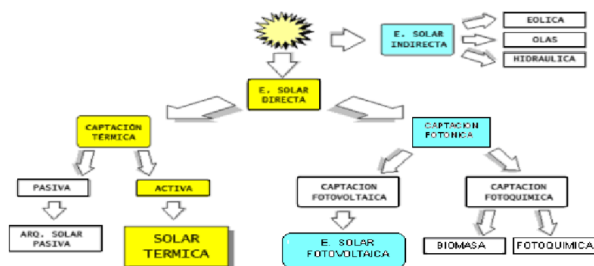
Existen tres tipos de radiación solar: ultravioleta, visible e infrarroja; las tres representan distintos porcentajes de energía solar que llega a la tierra; la primera representa un 9%, la segunda un 40% y la tercera un 51 %.

4.1.4 Captación de energía solar

El sol al ser una fuente limpia e inagotable para el hombre, se puede aprovechar en toda la superficie de la tierra en mayor o menor grado. Debido a su abundancia y disponibilidad se hace adecuada en diferentes usos, ya que, de forma directa o indirecta, de forma natural o artificial, es una constante en la estructura agrícola, urbana, industrial, tecnológica, entre otros. Por esta razón es conveniente diferenciar las distintas formas de captar la energía solar que se consideran dentro del concepto de energías renovables tal como lo expresa Benavides, Simbaqueva y Zapata (2017).

En la Figura 1 aparecen de forma esquemática los diversos procedimientos de captación.

Figura 1. Aprovechamiento y captación de Energía Solar



Fuente: Tello (2010)

4.1.5 La energía solar fotovoltaica

El aprovechamiento de la Energía Solar Fotovoltaica se realiza a través de la transformación directa de la energía solar en energía eléctrica, por medio del efecto fotovoltaico. Esta transformación se da por medio de las “células solares”, las cuales se comportan como semiconductores (por ejemplo,

silicio), permitiendo la generación de electricidad cuando incide sobre ellos la radiación solar (Madrid Solar, 2006).

El silicio es un material abundante en nuestro planeta, como también tiene un proceso de reciclado de la industria electrónica, aunque ello no impide que la elaboración de los lingotes de silicio, cortados y transformados en las células sea un proceso laborioso y complicado de modo que resulta teniendo alta inversión tanto económica como en cuestión de tiempo, debido a que todas las células que componen un panel solar fotovoltaico deben tener las mismas características, lo que representa que después de la fabricación de las mismas, hay que seguir un proceso de clasificación y selección.

La energía solar fotovoltaica tiene múltiples aplicaciones ejemplo la aeroespacial, calculadoras, juguetes, instalaciones en viviendas a gran escala para el consumo en general o a pequeña escala. Principalmente se pueden identificar dos tipos de instalaciones, primero las de conexión a red, en donde la energía producida es usada completamente para la venta a la red eléctrica de distribución, y la segunda, las aisladas de red, utilizadas para el autoconsumo.

4.1.6 Sistema fotovoltaico

Se define al sistema fotovoltaico como un conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que ayudan a captar y transformar la energía solar que se dispone, para luego transformarla en utilizable como energía eléctrica.

Esta última es acondicionada según los requerimientos y necesidades de una aplicación determinada, y ser aprovechada por el hombre.

Su funcionamiento comienza cuando la luz solar incide sobre la superficie del arreglo fotovoltaico, donde se transmuta en energía eléctrica de corriente directa por las células solares; dicha energía es recogida y conducida hasta un regulador de carga solar, el cual tiene como función enviar esta energía hasta el banco de baterías, en donde es almacenada, cuidando que se genere sobrecarga y sobredescarga; en algunos de los diseños de los sistemas fotovoltaicos, parte de esta energía es enviada directamente a las cargas. Estos sistemas, pueden ser catalogados en sistemas fotovoltaicos de conexión a red y autónomos (Mc Graw-Hill, 2019).

4.1.7 Sistemas fotovoltaicos de conexión a red

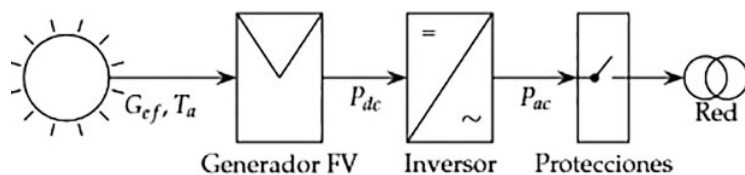
Un Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red (SFCR) es un sistema cuya función es producir energía eléctrica en condiciones adecuadas para poder ser inyectada en la red convencional, un SFCR se compone del generador fotovoltaico, un inversor DC/AC y un conjunto de protecciones eléctricas. La energía que se deriva de este sistema será consumida parcial o totalmente en las cercanías, y la energía restante será inyectada en la red para su distribución a distintos puntos de consumo (Perpiñan, 2012).

Es común que existan mecanismos de retribución económica que compensan al propietario del sistema por la energía que su sistema intercambia con la red. Pueden distinguirse, de forma simplificada, dos esquemas: la retribución con prima (feed-in tariff) y el balance neto (net-metering). En el mecanismo de retribución con prima, normalmente el propietario del SFCR recibe ingresos derivados de la energía total producida, en este caso, el diseño no necesita considerar un consumo a satisfacer, como sí será necesario en el caso en los sistemas autónomos o de bombeo (Perpiñan, 2012).

Con este mecanismo, el objetivo del diseñador es que la producción en un año del sistema sea la máxima posible, eso sin

considerar los consumos cercanos, en este caso, el mecanismo favorece la implantación de los sistemas fotovoltaicos, en cuanto el coste de la energía producida es superior al de la tarifa eléctrica convencional, no obstante, explícitamente se favorece la generación distribuida, sin condicionante adicional, lo cual puede ocasionar un crecimiento desordenado que disocie las ubicaciones de los sistemas fotovoltaicos de los centros de consumo (Perpiñan, 2012) (Figura 2).

Figura 2. *Esquema de un SFCR.*



Fuente: (Perpiñan, 2012)

4.1.8 Sistemas fotovoltaicos autónomos

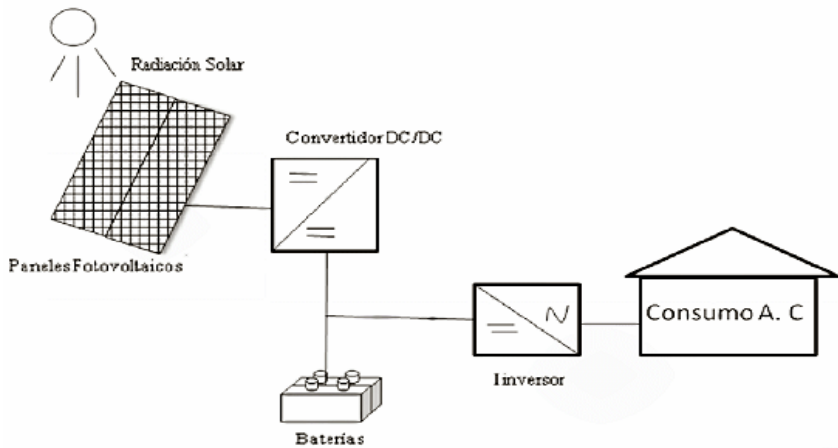
Un sistema fotovoltaico autónomo (SFA) produce energía eléctrica para satisfacer el consumo de cargas eléctricas no conectadas a la red, empleando un sistema de acumulación energético para hacer frente a los períodos en los que la generación es inferior al consumo (Perpiñan, 2012).

Los sistemas domésticos (SHS) incorporan únicamente cargas en continua, razón por la cual, no es necesario que el SFA incluya un inversor. Estos sistemas se conforman por el generador, un acumulador electroquímico y un regulador de carga y descarga, y cuando el consumo incluye cargas de alterna es necesario que el SFA incluya un inversor. Es importante mencionar que existe la posibilidad de que el consumo esté compuesto por cargas en continua y en alterna, o exclusivamente por cargas en alterna (Perpiñan, 2012).

El funcionamiento del inversor puede ocasionar la circulación de transitorios de corriente que el regulador no es capaz de gestionar correctamente. Por este motivo, se recomienda que el inversor esté directamente acoplado a la batería, y no a la salida del regulador. Los inversores para SFA suelen incorporar un mecanismo de regulación de descarga que permite esta conexión. El funcionamiento de estos inversores es, en muchos aspectos, similar al de los inversores de conexión a red, pero con varias peculiaridades (Perpiñan, 2012).

La diferencia transcendental que se registra está en la salida, debido a que los inversores no se conectan a la red con la que sincronizan, y deben funcionar como fuentes de tensión, y no como fuentes de corriente. Generalmente no se incluye un buscador del punto de máxima potencia (Perpiñan, 2012) (ver Figura 3).

Figura 3. Sistema fotovoltaico autónomo



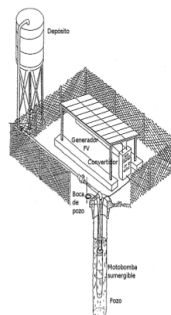
Fuente: (McGraw-Hill, 2019)

4.1.9 Sistemas fotovoltaicos de bombeo

Un sistema fotovoltaico de bombeo (SFB) emplea un generador fotovoltaico para alimentar una motobomba y extraer agua de un pozo, almacenarla en un depósito o transportarla de un lugar a otro (Perpiñan, 2012).

Esta aplicación de la tecnología fotovoltaica posee dos peculiaridades que la hacen particularmente atractiva. En primer lugar, las curvas de generación y de consumo están bien adaptadas: las épocas de mayor radiación solar y consiguiente productividad eléctrica son a la vez las de mayor consumo de agua. En segundo lugar, no es necesario emplear acumuladores electroquímicos para almacenar energía y dotar de autonomía al sistema: un depósito elevado de agua almacena energía potencial de forma más barata, segura, eficiente y fiable. Se habla entonces de un sistema fotovoltaico de bombeo directo (SFBD). Dado que el empleo de depósitos de agua como medio de acumulación es, con diferencia, la configuración más extendida, a lo largo de este capítulo obviaremos esta distinción (Perpiñan, 2012) (ver Figura 4).

Figura 4. Componentes de un sistema fotovoltaico de bombeo de agua



Fuente: (Perpiñan, 2012)

4.2 Componentes de sistemas fotovoltaicos

4.2.1 *Célula Solar*

Supongamos una red cristalina formada por átomos. Según los postulados de la Mecánica Cuántica, los electrones de un átomo aislado pueden existir únicamente en determinados estados de energía. A medida que disminuye la distancia interatómica comienza a observarse la interacción mutua entre los átomos hasta formarse un sistema electrónico único. Las fuerzas de repulsión y atracción entre los átomos encontrarán su equilibrio cuando los átomos estén separados por la distancia interatómica típica del cristal que se trate.

La separación real entre átomos en el cristal será aquella para la cual la energía del sólido sea mínima. En un sólido el número de átomos están elevado que los niveles de energía forman bandas continuas de energía. Los electrones asociados a los átomos del sólido llenan estas bandas en orden ascendente.

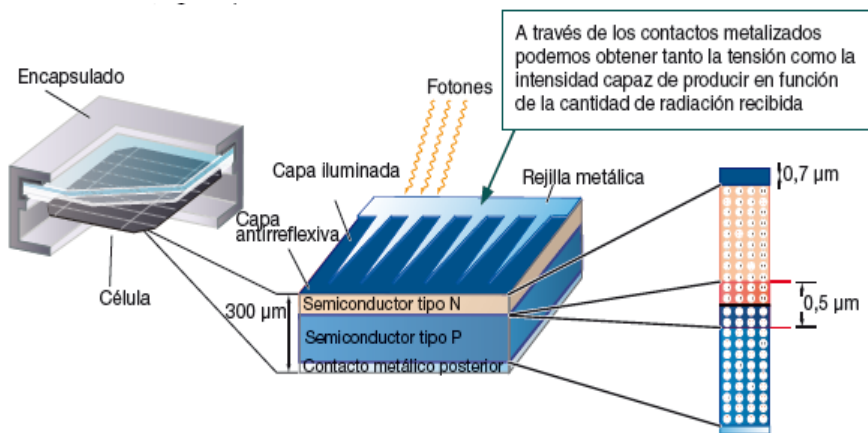
La banda de mayor energía completamente ocupadas y denomina banda de valencia (electrones ligados a átomos). La siguiente banda, parcialmente ocupada o vacía, se denominada banda de conducción (electrones desligados de átomos). Estas bandas pueden estar separadas por otra banda de energías que corresponde a estados no permitidos, y de ahí que a esta banda se la denomine banda prohibida, o bien pueden estar solapadas permitiendo una transición fácil de una a otra (Perpiñan, 2012).

Al estudiar los componentes de la energía solar se debe comenzar por el principal elemento denominada célula solar, se caracteriza por realizar la conversión fotovoltaica, fabricadas a partir de silicio cristalino.

Una célula solar se comporta como un diodo, es decir que la parte expuesta a la radiación solar es la N, y la parte situada

en la zona de oscuridad, la P. Los terminales de unión de la célula se encuentran sobre cada una de estas partes del diodo, la cara correspondiente a la zona P se encuentra metalizada completamente, lo cual indica que no debe recibir luz, mientras que en la zona N el metalizado tiene forma de peine, con el fin de que la radiación solar llegue al semiconductor (McGraw-Hill, 2019) (Figura 5).

Figura 5. Estructura de la célula solar



Fuente. (Cepeda & Sierra, 2017)

Importante saber que las células solares empezaron a surgir a partir de la década 50 cuando abordaron el suministro energético de los satélites.

4.2.1.1 Parámetros fundamentales de la célula solar

Los parámetros fundamentales de la célula solar son explicados en la Figura 6.

Figura 6. Parámetros fundamentales de la célula solar

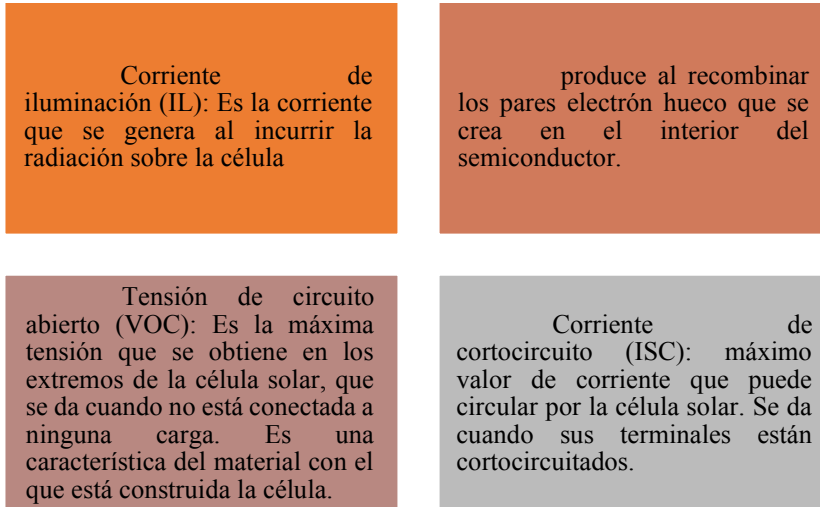


Figura 7. Fuente: Elaboración propia

4.2.1.2 Funcionamiento de una célula solar

Para entender la operación de una célula solar, se debe considerar la naturaleza del material y la naturaleza de la luz del sol. Las células solares están formadas por materiales semiconductores que aprovechan la luz de ciertas longitudes de onda y que pueden ionizar los átomos en el material al provocarse el efecto fotovoltaico, esta energía golpea los electrones libres permitiéndoles fluir libremente, originando así, un circuito eléctrico normal de pequeñas corrientes eléctricas, obteniendo así una diferencia de potencial (Núñez & Salazar, 2014).

Cuando la célula solar es conectada a una carga, los valores de tensión e intensidad varían. Existirán dos de ellos para los cuales la potencia entregada sea máxima: V_m (tensión máxima) e I_m (intensidad máxima), que siempre serán menores que e . En función de estos valores, la potencia máxima que puede entregar la célula solar será,

$$P_m = V_m I_m$$

Esto nos permite definir un parámetro de la célula solar que recibe el nombre de factor de forma (FF) y que se calcula mediante la fórmula:

$$FF = \frac{V_{mIm}}{V_{oc}I_{sc}}$$

De esta manera, el factor de forma es el cociente entre la máxima potencia que puede entregar la célula a la carga y el producto de la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito. Entre las células solares más habituales, los valores típicos de FF son 0,7 o 0,8.

4.2.1.3 Fabricación

A continuación se desarrolla una descripción detallada del procedimiento de fabricación de una célula solar de silicio cristalino.

El silicio puede extraerse de la cuarcita obteniendo silicio de grado metalúrgico (98% pureza). La industria de la electrónica necesita silicio de grado electrónico (nivel de impureza por debajo de 10^{-10} , o 9 nueves). Sin embargo, para las células solares puede utilizarse silicio de grado solar cuyo nivel de impureza es algo mayor. Durante mucho tiempo, el sector solar aprovechaba el silicio que la industria electrónica no aprovechaba; sin embargo, el despegue experimentado por el sector en los últimos años ha supuesto que la demanda de silicio para fabricación de células adquiriera entidad propia.

Al mezclar silicio con ácido clorhídrico se produce triclorosilano, que es destilado para eliminar impurezas. Al unir silano de cloro con hidrógeno se obtiene de vuelta silicio, válido para células policristalinas (varios cristales en cada célula). Para obtener mayor pureza se emplea el silicio monocristalino

(un solo cristal) obtenido mediante el proceso de Czochralski o similar (se utiliza una semilla de cristal para crecer silicio a muy alta temperatura). El lingote resultante debe ser cortado en obleas de $200\mu\text{m} - 500\mu\text{m}$.

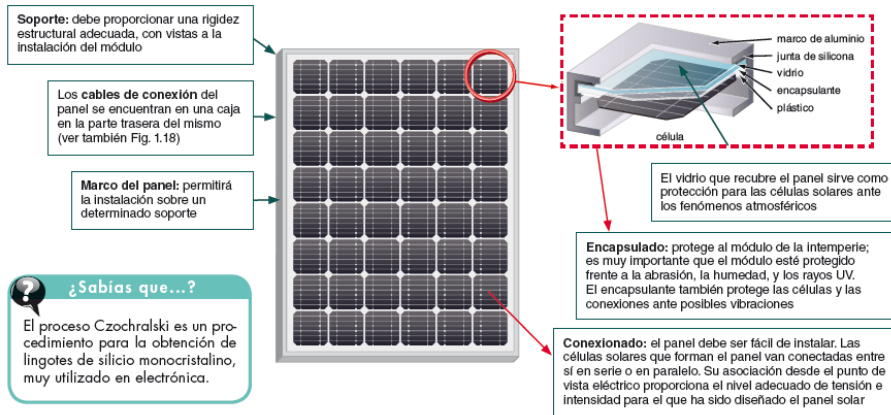
Las obleas son sometidas a un proceso de limpieza para eliminar impurezas por el corte. A continuación, son dopadas con fósforo y boro para crear la unión p-n. Se limpian los bordes para evitar la formación de cortocircuitos entre las zonas p y n y se añaden los contactos posteriores (con alto recubrimiento) y anterior (cuya densidad debe ser optimizada para obtener baja R_s con poco sombreado) empleando aleaciones de plata y aluminio.

Para reducir las pérdidas por reflexión sea de una capa antirreflexiva con, por ejemplo, óxido de titanio, causante del color azulado de muchas células. Si es posible, se textura la superficie (creación de mini pirámides) para reducir aún más la reflexión de la radiación incidente. (perpiñan, 2018).

4.2.2 El panel solar

Un panel solar está formado por un conjunto de células, conectadas eléctricamente, encapsuladas, y montadas sobre una estructura de soporte o marco, como lo muestra la figura 7. Proporciona en su salida de conexión una tensión continua, y se diseña para valores concretos de tensión (6 V, 12 V, 24 V.), que definirán la tensión a la que va a trabajar el sistema fotovoltaico.

Figura 8. Constitución de un panel solar. Se destacan sus principales características



Fuente: (*administración de proyectos*, 2018)

Las características eléctricas de una célula no son suficientes para alimentar las cargas convencionales. Es necesario realizar agrupaciones en serie y paralelo para entregar tensión y corriente adecuadas. Un panel solar es una asociación de células a las que protege físicamente de la intemperie y aísla eléctricamente del exterior, dando rigidez mecánica al conjunto. Existen multitud de paneles diferentes, tanto por su configuración eléctrica como por sus características estructurales y estéticas. En general, la asociación de células es encapsulada en dos capas de EVA (etileno-vinilo-acetato), entre una lámina frontal de vidrio y una capa posterior de un polímero termoplástico (frecuentemente se emplea el tedlar) u otra lámina de cristal cuando se desea obtener paneles con algún grado de transparencia.

Muy frecuentemente este conjunto es enmarcado en una estructura de aluminio anodizado con el objetivo de aumentar la resistencia mecánica del conjunto y facilitar el anclaje del módulo a las estructuras de soporte. El vidrio frontal debe tener y mantener una alta transmisividad en la banda espectral en

la que trabajan las células solares. Además, debe tener buena resistencia al impacto y a la abrasión.

Su superficie debe ser de forma que combine un buen comportamiento antireflexivo con la ausencia de bordes o desniveles que faciliten la acumulación de suciedad o dificulten la limpieza de esta mediante la acción combinada del viento y la lluvia. Frecuentemente se emplea vidrio templado con bajo contenido en hierro con algún tipo de tratamiento antireflexivo. El encapsulante a base de EVA, combinado con un tratamiento en vacío y las capas frontal y posterior, evita la entrada de humedad en el módulo, señalada como la causa principal de la degradación a largo plazo de módulos fotovoltaicos.

Además, esta combinación permite obtener altos niveles de aislamiento eléctrico. Una configuración eléctrica muy común hasta hace unos años empleaba 36 células en serie para obtener paneles con potencias comprendidas en el rango 50Wp – 100Wp conteniendo en MPP cercanas a los 15 V funcionamiento.

Estos paneles eran particularmente adecuados para su acoplamiento con baterías de tensión nominal 12V en los sistemas de electricidad rural. Con el protagonismo abrumador de los sistemas fotovoltaicos de conexión a red, esta configuración ha perdido importancia. Ahora son frecuentes los paneles de potencia superior a los 200Wp y tensiones en el rango 30V – 50V.

Para los módulos compuestos por células de silicio cristalino es de aplicación la norma internacional IEC 61215 “Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules - Design Qualification and Type Approval”. Esta norma internacional recoge los requisitos de diseño y construcción de módulos fotovoltaicos terrestres apropiados para su operación en períodos prolongados de tiempo bajo los efectos climáticos. Asimismo, esta norma detalla un procedimiento de pruebas a los que se debe someter el módulo que desee contar con la certificación asociada a esta normativa. (perpiñan, 2018).

4.2.2.1 Tipos de paneles solares

Los tipos de paneles solares vienen dados por la tecnología de fabricación de las células y son fundamentalmente en Silicio cristalino (monocristalino y multicristalino) y Silicio amorfo, como lo muestra la tabla 4.

Tabla 4. Diferencias entre los paneles según la tecnología de fabricación

Células	Silicio	Rendimiento laboratorio	Rendimiento directo	Características	Fabricación
	Monocristalino	24 %	15 - 18 %	Son típicos los azules homogéneos y la conexión de las células individuales entre sí (Czochralski).	Se obtiene de silicio puro fundido y dopado con boro.
	Policristalino	19 - 20 %	12 - 14 %	La superficie está estructurada en cristales y contiene distintos tonos azules.	Igual que el del monocristalino, pero se disminuye el número de fases de cristalización.
	Amorfo	16 %	< 10 %	Tiene un color homogéneo (marrón), pero no existe conexión visible entre las células.	Tiene la ventaja de depositarse en forma de lámina delgada y sobre un sustrato como vidrio o plástico.

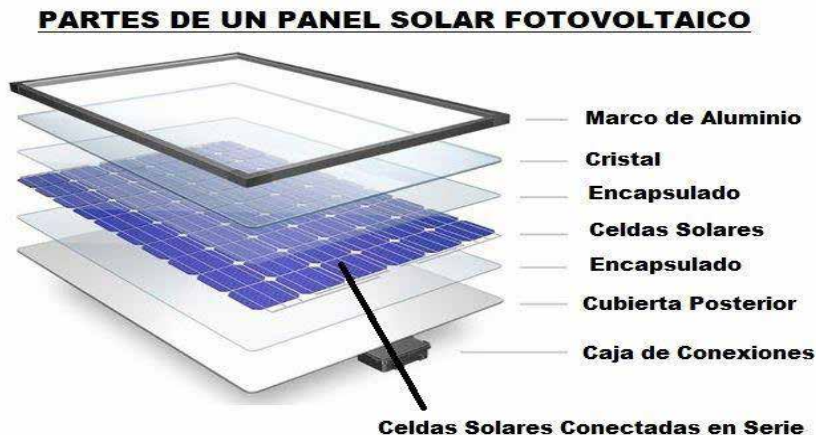
Fuente: (administración de proyectos, 2018)

4.2.2.2 Elaboración

Un panel solar está formado por un conjunto de células solares conectadas eléctricamente. Este conjunto de células está envuelto por unos elementos que le confieren protección frente a los agentes externos y rigidez para acoplarse a las estructuras que los soportan. Los elementos que conforman un panel fotovoltaico.

Las partes que constituyen un panel, tienen ciertas características; las mismas que se indican en la figura 8:

Figura 9. Partes de un panel solar fotovoltaico



Fuente: (*tecnología*, 2018)

Las características de potencia, tensión corriente, etc., están en función de la cantidad de celdas con que se dota a cada modelo, así como de su configuración; bien sea en serie y/o paralelo y de cuánta luz llega hasta el módulo.

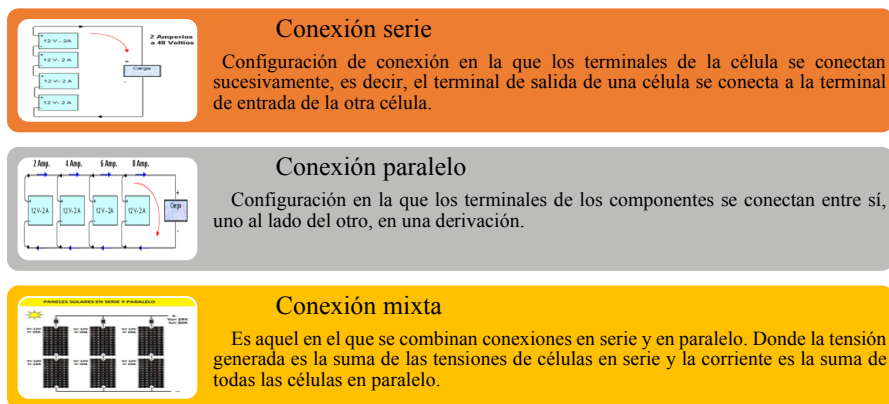
En el mercado, también se encuentran otros paneles fotovoltaicos; su proceso de fabricación es igual, la única y gran diferencia radica en que se agrega un baño de una delgada capa de silicio amorfo sobre una superficie de vidrio o plástico, logrando obtener una sola placa, estos paneles son más económicos y son utilizados en sistemas de baja potencia. (Tello, 2010, pág. 27).

4.2.2.3 Conexión de celdas

Los paneles pueden tener diferentes tamaños, los más utilizados están formados por 36 celdas conectadas eléctricamente en serie, con una superficie que oscila entre los 0,5 m² a los 1,3 m², alcanzando una potencia de 50 Wp (Watt pico), de energía solar bajo condiciones de luz solar plena, como lo muestra la figura 9.

El número de celdas que contienen los paneles depende de la aplicación para la que se necesita. Con la conexión de las celdas se pueden encontrar los voltajes y corrientes deseados, según el siguiente criterio (Tello, 2010, pág. 27).

Figura 10. Tipos de conexiones de las celdas de un panel solar



Fuente: Elaboración propia

De lo expuesto anteriormente se puede resumir en lo siguiente:

$I_{\text{total}} = I \times \text{número de celdas en paralelo}$

$V_{\text{total}} = V \times \text{número de celdas en serie}$

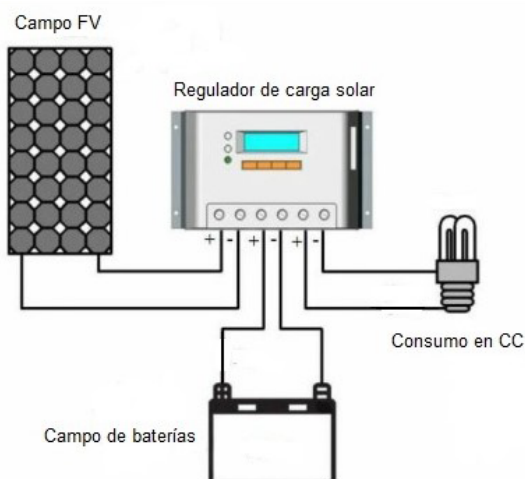
De esta manera se puede configurar el número de celdas conectadas en serie para tener módulos que sirvan para cargar acumuladores de 6V, 12 V y 24 V. De igual manera, dependiendo de las necesidades; los paneles fotovoltaicos pueden ser conectados en serie o paralelo con el propósito de incrementar el voltaje o la corriente. (Tello, 2010)

4.2.3 Regulador de carga solar

Las células solares, se agrupan y se protegen de la intemperie, formando paneles solares. Los paneles, el cableado y el soporte de fijación forman el generador fotovoltaico, el cual es el elemento encargado de transformar la radiación solar en energía eléctrica. Esta electricidad se produce en corriente continua, y sus características dependen de la intensidad energética de la radiación solar y de la temperatura ambiente. Entre el campo fotovoltaico y el campo de baterías se utiliza un regulador de carga solar, el cual controla el flujo de energía que circula entre ambos componentes.

El regulador de carga solar, figura 10 controla y administra la intensidad de la carga y la descarga de las baterías, permitiendo la optimización del sistema, con el fin de alargar su vida útil. Controla la entrada de energía a las baterías de los paneles solares, con el fin de evitar sobrecargas (Monsolar, 2018).

Figura 11. Regulador de carga solar



Fuente: (monsolar, 2018)

4.2.3.1 Funciones y tipos de reguladores

El regulador de carga realiza básicamente dos funciones:

- a. Prevenir que las baterías se sobrecarguen, o que se puedan descargar por la noche en el campo fotovoltaico por inversión de corriente.
- b. Eliminar el flujo de corriente de las baterías a las fotoceldas.
- c. Existe otra función que suele tener el regulador de carga solar y que este solo realiza cuando tiene conectado un consumo en corriente continua. Se trata de la protección frente a descargas profundas.

Existen dos tipos de reguladores de carga para instalaciones fotovoltaicas:

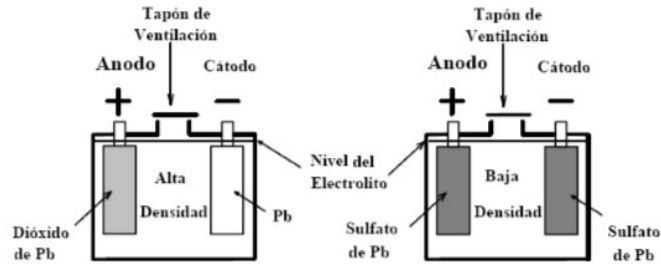
- a. Los reguladores PWM (Modulación por anchura de pulsos).
- b. Los reguladores MPPT (Seguidor del Punto de Máxima Potencia).

4.2.4 Baterías

La energía se acumula en una batería, para almacenar en un momento dado energía química, que devuelve en otro momento en forma de energía eléctrica, estos deben ser dimensionados de la manera que garanticen una suficiente autonomía para los períodos en los que el sistema fotovoltaico no produce electricidad.

Los acumuladores constan por lo general de dos clases de placas (electrodos), sumergidas en una solución ácida electrolítico (Tello, 2010).

Figura 12. Batería cargada vs. batería descargada



Fuente: (Tello, 2010)

4.2.4.1 Características técnicas de las baterías

Las características técnicas que definen una batería de acumulación son las siguientes: la tensión nominal, la cantidad de la energía que puede almacenar, la máxima corriente que puede entregar (descargar), la profundidad de descarga que puede sostener, etc.

4.2.4.2 Tipos de batería

Existen muchos tipos de baterías, pero en la tabla 5 se mencionará una clasificación general de las disponibles en el mercado:

Tabla 5. Tipos de baterías disponibles en el mercado

Tipos de baterías	Características
Baterías de arranque	Son las baterías más comunes, baratas y disponibles en todos los lugares, su uso común es en automóviles y están cargadas casi siempre por completo.
Baterías de tracción	Tienen mayor costo y son diseñadas para operar con ciclos de descarga profunda. Estas baterías, tienen un auto descarga relativamente grande y una eficiencia de carga baja.

Baterías estacionarias	Son usadas en instalaciones grandes y cuestan de 3 a 6 veces más que las baterías de arranque comunes. Pueden ser gelificadas, selladas y aptas para ser colocadas en posición vertical u horizontal.
Baterías Plomo-Ácido	Estas baterías se componen de varias placas de plomo en una solución de ácido sulfúrico. La placa consiste en una rejilla de aleación de Plomo con una pasta de óxido de Plomo incrustada sobre la rejilla. La solución de ácido sulfúrico y agua se denomina electrolito, de allí se derivan las baterías solares.
Baterías Solares	Generalmente se trata de baterías que, por su geometría y materiales usados, se tiene que realizar un análisis de costo, vida útil (número de ciclos de carga/descarga) y que sea libre de mantenimiento. Los electrodos de una batería solar tienen una aleación de antimonio, permitiendo adherir una mayor cantidad de material activo que aumenta el peso y el costo de la batería. Por ejemplo una batería de 6V, con volumen similar a la de 12 V de automotor, pesa más de 30 Kg.

Fuente: Elaboración de autores

4.2.5 El Inversor

El inversor es el componente que convierte la energía eléctrica (corriente continua) producida por los paneles en corriente alterna de las mismas características que la de la red eléctrica.

La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de corriente directa a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el diseñador. Los inversores se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, desde pequeñas fuentes de alimentación para

computadoras, hasta aplicaciones industriales para manejar alta potencia. Los inversores también se utilizan para convertir la corriente continua generada por los paneles solares fotovoltaicos, acumuladores o baterías, etc., en corriente alterna y de esta manera poder ser inyectados en la red eléctrica o usados en instalaciones eléctricas aisladas. (Tello, 2010).

Existen diferentes tipos de inversores, pero es recomendable escogerlo de acorde a la instalación a implementarse.

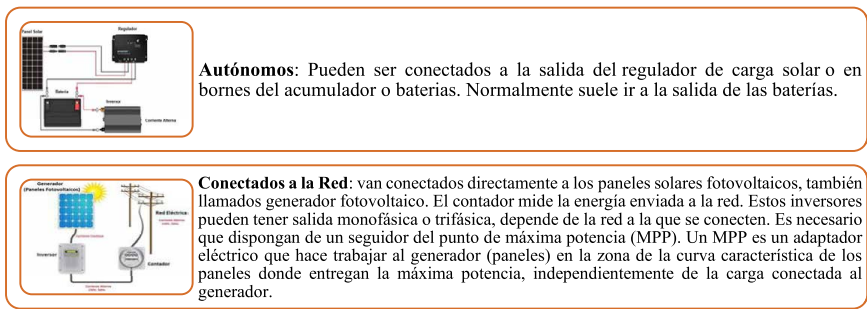
Figura 13. Inversor fotovoltaico



Fuente: (Tecnología, 2018)

4.2.5.1 Inversores para Sistemas Fotovoltaicos

Figura 14. Inversores para sistemas fotovoltaicos



Fuente: Elaboración propia.

4.2.5.2 Características y tipos de inversores

La característica más importante de un inversor es su rendimiento, que se define como la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada del inversor.

Los principales parámetros habituales a tener en cuenta en un inversor son: Eficiencia o rendimiento, tensión nominal (V), potencia nominal (VA), Potencia activa (W), Capacidad de sobrecarga, factor de potencia, autoconsumo, rizado de corriente, forma de la Onda, los armónicos y la distorsión armónica.

Existen tres tipos de inversores: los de onda cuadrada, de onda semi-senoidal y los senoidales.

4.3 Dimensionamiento de los sistemas solares fotovoltaicos

Para llevar a cabo los dimensionamientos de los sistemas solares fotovoltaicos se basan en pasos y cálculos con las siguientes formulas:

- Calcular la caracterización de consumo y censo de carga. partir de la potencia en vatios de cada aparato de consumo y estimar el número medio de horas de funcionamiento.
- Calcular en WH consumo diario **ET**.
- Elegir número **N** de días de autonomía. Definir profundidad de descarga máxima **Pd** de acuerdo a hoja de especificaciones del fabricante y determine el valor de auto descarga diaria si se tienen datos suficientes.

- Calcular la energía necesaria teniendo en cuenta las pérdidas. $E = ET/R$

$$R = 1 - 1 - kb - kc - kv \quad T \quad ka N Pd - kb - kc - kv$$

R = Rendimiento del sistema de Almacenamiento.

kb = Coeficiente de pérdidas por rendimiento del acumulador.

ka = Coeficiente de auto descarga.

kc = Coeficiente de Pérdidas del Inversor.

kv = Coeficiente que agrupa otras pérdidas. (otros componentes (Diferencia de potencias nominales a potencias reales consumidas, conducción, conexiones).

Los valores más usuales (a tomar en defecto de otros más precisos) son:

$$kb = 0.05$$

$$ka = 0.005$$

$$kc = 0 \text{ No hay inversor}$$

$$0.06 - 0.13 \text{ inversor senoidal}$$

$$0.1 \text{ Inversor de Onda cuadrada}$$

$$kc = 0.15 \text{ Si las potencias de los consumos son las nominales o teóricas}$$

$$0.1 \text{ Si no se dispone de información en detalle de los rendimientos}$$

$$0.05 \text{ Si las potencias son las realmente consumidas (incluyendo pérdidas)}$$

- Calcular la capacidad útil de la batería. ***Cu***

$$Cu = EN [W.h]$$

$$Cu = Cu = \frac{EN}{\text{Voltaje del sistema (12,24,48V)}} [A.h]$$

N=Días de Autonomía.

E=Demanda de Energía Diaria (W.h/día)

N=Días de Autonomía.

E=Demanda de Energía Diaria (W.h/día)

- Calcular la capacidad nominal de la batería. ***C***

$$C = Cu / Pd [A.h]$$

Pd =Profundidad de descarga admitida.

- Identificar horas de sol pico “HSP” según la posición geográfica. “horas de sol pico”, horas de sol a una intensidad de 1000 w/m²
- Identificar energía que deben producir los paneles.

$$Ep = E / Ep$$

Ep =Energía que deben producir los paneles.

E=Demanda de energía diaria

$\eta_{p(PHSP)}$ = Rendimiento por pérdidas en el controlador de carga y el panel.

- Número de paneles necesarios.

$$\text{N}^\circ \text{ de paneles} = \frac{E_p}{[P(HSP)]}$$

- Dependiendo de las limitaciones de los equipos como el controlador de carga. (12, 24, 48V) Voltaje de sistema, voltaje nominal de las baterías y la máxima corriente de entrada del controlador de carga, se hace la configuración de conexión de las baterías y de los paneles.

4.4 Ejemplo de aplicaciones

4.4.1 Vivienda solar aislada

4.4.1.1 Localización

El hogar al que se le va hacer el dimensionamiento para una instalación fotovoltaica queda en el santuario de fauna y flora de Iguaque, exactamente en una vereda llamada la Hondura que pertenece al municipio de Chíquiza. Su ubicación se observa en la Figura 14, con coordenadas (5, 6447, -73, 4817).

Figura 15. Ubicación Municipio de Chíquiza, Colombia



Fuente: Google Maps

4.4.1.2 Cálculos y selección de componentes

El cálculo de la hora solar pico (HSP) promedio es el siguiente:

$$H_{sp} = \frac{\sum \text{radiacion por mes}}{12} = 5.45 \text{ kwh/m}^2$$

Con consumo diario de la vivienda de 5Kwh/día se obtiene los siguientes resultados:

- **Cálculo del panel solar**

Las pérdidas son:

$$\begin{aligned}k_b &= 0.05 \text{ coeficiente de perdidas rendimiento del acumulador } k_a \\&= 0.001 \text{ coeficiente de autodescarga } k_c \\&= 0.06 \text{ coeficiente de perdidas del inversor } k_v \\&= 0.15 \text{ coeficiente que agrupa otras perdidas}\end{aligned}$$

Con un rendimiento global de:

$$\begin{aligned}R &= 1 - \{(1 - 0.05 - 0.06 - 0.15) * \frac{0.001(2)}{0.5}\} - 0.05 - 0.06 - 0.15 \\R &= 0.7370\end{aligned}$$

El consumo de energía teniendo en cuenta las pérdidas son:

$$E = \frac{E_T}{R} E = \frac{5000Wh}{0.7370} E = 6784.26 \text{ Wh} = 6.78Kwh$$

El consumo de energía teniendo en cuenta las pérdidas son:

$$\begin{aligned}P_p &= 1 - (k_b + k_v) = 1 - (0.05 + 0.15) P_p = 0.8 E_p = \frac{E}{P_p} = \frac{6784.26 \text{ Wh}}{0.8} = 8480.32 \text{ Wh} \\&= 8.84 \text{ Kwh}\end{aligned}$$

La potencia que debe generar el sistema es:

$$\dot{w} = \frac{E_p}{H_{sp}}$$

$$\dot{w} = 8.48 \text{Kwh} / 5.45 \text{ kwh/m}^2$$

$$\dot{w} = 1.5 \text{Kw} = 1556 \text{w}$$

- **Selección del panel solar**

Se realizó la selección de un panel solar policristalino como se observa en la Figura con una capacidad de 270 W, energía máxima de voltaje de 30.7, energía máx. de corriente de 8.79 con voltaje máx. de 1000V, El sistema va a trabajar a 24v.

Figura 16. Panel solar de 270 w



Fuente: (*Renovables del este*, 2018)

Teniendo en cuenta la potencia del panel seleccionado, se hallan el número de paneles que se necesitan para el sistema de la siguiente manera:

$$N^{\circ} \text{ PANELES} = \frac{E_p}{P * HSP}$$

$$N^{\circ} \text{ PANELES} = \frac{8.48 \text{Kwh}}{(0.270 \text{Kw})(5.45 \text{Kwh/m}^2)} \quad N^{\circ} \text{ PANELES} = 5.76 \cong 6$$

Del panel que se seleccionó se requieren 6 unidades para generar la potencia que requiere el sistema.

Como el voltaje es de 24v, la corriente es de 8.79Am y una potencia de 270W por cada uno de los paneles y tenemos una conexión en paralelo por lo tanto la salida de voltaje, corriente y potencia en este montaje será de: 24v, 52.74Am y 1600w.

- **Cálculo de Regulador**

$$ISC = 9.76 \text{ Amp} * 6ISC = 58.56 \text{ Amp} \quad ISC_{TOTAL} = ISC * F.S = 58.56 \text{ Amp} * 1.25 \\ = 73.2 \text{ Amp}$$

- **Selección de Regulador**

Como el sistema va a trabajar a 24v y una corriente de 73.2Am se realiza la selección del regulador que tenga estas características. Por esta razón se va a usar un regulador Damia solar de 80Am Figura.

Figura 17. *Regulador*



Fuente: (Madrid solar, 2018)

- **Cálculo de baterías**

La capacidad útil de la batería es:

$$Cu = E * N = 8480.32w * 2 = 16960.64 \text{ W.h} \\ Cu = \frac{16960 \text{ W.h}}{24V} = 706.69 \text{ Amp.h}$$

La Capacidad nominal de la batería es:

$$C = \frac{Cu}{P_d} = \frac{706.69}{0.5} = 1413.38 \text{Amp.}$$

$$C = 1500 \text{Amp.h}$$

- **Selección de baterías**

De acuerdo a esta capacidad nominal se realiza la selección de unas baterías de 12v, 260Ah de marca fórmula car.

Figura 18. *Batería 12v y 260 Ah*



Fuente: (Autosolar, 2018)

Se tiene el montaje de las 6 baterías que se necesitan para almacenar energía con una corriente 1500Ah a 24v, por esta razón se hace la conexión de serie y paralelo para obtener estos valores.

- **Cálculo del inversor**

$$\begin{aligned} Imp_{total} &= I_{panel} * N^{\circ} \text{ PANELES} = 8.79 \text{Amp.h} * 6 Imp_{total} = 52.74 \text{Amp.h} P_{inv} \\ &= F.S * \dot{w} = 1,20 * 1.62 \text{Kw.h} P_{inv} = 1.9 \text{K w} \end{aligned}$$

- **Selección del inversor**

Con los datos obtenidos se realiza la selección de un inversor de onda senoidal pura, de 24V a 110 V

Figura 19. *Inversor onda senoidal*



Fuente: (Azimut caravanning, 2018)

- **Cálculo de cables y sus protecciones**

- *Paneles a regulador*

$$\frac{2*L*I_c}{56*(\Delta v)}=A$$

$$A=\frac{2*9*10,2}{56*0,24}=13,66mm^2$$

- *Regulador a baterías*

$$S=\frac{2*2*24}{56*0,24}=7,14mm^2\approx 8mm^2$$

L= longitud necesaria

I_c=corriente de corto de panel

Δv= voltaje utilizado

- **Selección de cables y sus protecciones.**

Se seleccionó un tipo de cable de calibre 8 marca Draka.

Figura 20. Cable de calibre 8



Fuente: *(Mercado libre, 2018)*

Se escogieron los breakers ELE025 de 280 V/40kA (protección de sobre tensión monofásico tipo 2) y ELE026 (protección de sobre tensión continua tipo 2).

Se realizó la selección de dos estructuras, una con capacidad de 4 paneles y la otra con capacidad de 2, para un total de 6 paneles que es los que se van a usar en el sistema.

4.4.2 Iluminación LED solar fotovoltaica para avenida de 2 km de longitud

4.4.2.1 Localización

Vía pública para avenida de 2 km en la zona rural de la ciudad de Tunja vía a Paipa

4.4.2.2 Cálculos y selección de componentes

El cálculo de la hora solar pico (HSP) promedio es el siguiente:

$$\mathbf{Hsp: 5,04 \text{ KW/m}^2 \text{ en Tunja}}$$

Con consumo diario de:

$$100w * 11hr = 1100wh = 1.1KW$$

Se obtienen los siguientes resultados:

- **Cálculo del panel solar**

Las pérdidas son:

N= 2 días de autonomía

$$P_d = 60\% = 0.6$$

$$k_b = 0.06 \text{ coeficiente de perdidas rendimiento del acumulador } k_a$$

$$= 0.006 \text{ coeficiente de autodescarga } k_c$$

$$= 0.13 \text{ coeficiente de perdidas del inversor } k_v$$

$$= 0.1 \text{ coeficiente que agrupa otras perdidas}$$

Con un rendimiento global de:

$$R = 1 - [(1 - k_b - k_c - k_v) k_a N / P_d] - k_b - k_c - k_v$$

$$R = 1 - \{(1 - 0.06 - 0.13 - 0.1) * \frac{0.006(2)}{0.6}\} - 0.06 - 0.13 - 0.1$$

$$R = 0.695$$

El consumo de energía teniendo en cuenta las pérdidas son:

$$P_p = 1 - (k_b + k_v) = 1 - (0.06 + 0.1)$$

$$P_p = 0,84$$

$$Et = \frac{\text{consumo dia}}{Pd}$$

$$Et = \frac{1100}{0.6} = 1833,3 \text{ w/h}$$

$$E = \frac{E_T}{P_p}$$

$$E = \frac{1833,3 \text{ Wh}}{0.84}$$

$$E = 2182,5 \text{ wh}$$

$$Wh = 2,1825 \text{ Kwh}$$

La potencia real es:

$$\text{potencia real} = \frac{E}{HSP}$$

$$= \frac{2182,5 \text{ wh}}{5.04}$$

$$433,03 \text{ Potencia real}$$

$$E_p = \frac{E}{R}$$

$$E_p = \frac{2182,5 \text{ Wh}}{0.695}$$

$$E_p = 3140,28 \text{ Wh}$$

$$= 3,1403 \text{ kw}$$

$$w = \frac{ep}{hsp}$$

$$w = \frac{3140,28 \text{ w/h}}{5.04 \text{ kw/m}^2} = 623,07 \text{ w}$$

Dando como resultado un consumo mensual y anual de:

$$\begin{aligned} &1.1\text{kw} * 30\text{dias}/\text{mes} \\ &=33 \text{ kw} \\ &33 \text{ kw}/\text{mes} * 12\text{meses} \\ &=396\text{kw al año} \end{aligned}$$

Voltaje del sistema: 24 V

- **Cálculo del panel solar**

$$N^{\circ} \text{ PANELES} = \frac{E_p}{P * HSP}$$

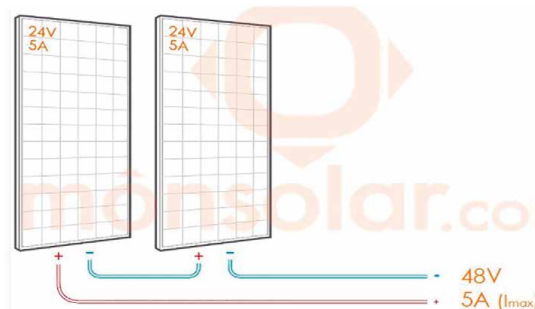
$$N^{\circ} \text{ PANELES} = \frac{3.14\text{Kw}}{(0.5)(5,04)}$$

$$N^{\circ} \text{ PANELES} = 1,24 \cong 2$$

- **Selección del panel solar**

Se selecciona un Panel monocristalino en serie de 250 W a 24v con alto rendimiento de 60 células

Figura 21. Conexión de dos paneles



Fuente. (Perpiñan, 2018)

- **Cálculo de Regulador:**

Con un factor de seguridad de:

$$F.s = 10\%$$

$$ISC_{Panel} = 8.80A$$

$$V = 24V$$

$$ISC = 8.80 \text{ Amp} * 2 = 17,6 \text{ Amp}$$

$$ISC_{TOTAL} = ISC * F.S = 17,6 \text{ Amp} * 1.1 = 18.81 \text{ Amp}$$

- **Selección de regulador**

Para seleccionar reguladores de baja potencia se utilizan reguladores paralelos y tienen que funcionar al mismo voltaje del sistema además ser capaz de trabajar con una intensidad de corriente mínima de 10 % superior a la intensidad máxima de los paneles fotovoltaicos, estos reguladores nos permiten regular sobre cargas véase en la Figura 35.

- **Cálculo de la batería**

$$ISC = 17,6 \text{ Amp.}$$

$$Cu = E * N = 2182,5 \text{ W} * 2 = 4365 \text{ Wh.}$$

$$Cu = \frac{4365 \text{ W.h}}{24V} = 181,87 \text{ Amp.h}$$

Capacidad nominal de la batería

$$C = \frac{Cu}{P_d} = \frac{181,81}{0.6} = 303,01 \text{ Amp.h}$$

- **Selección de la batería**

Se selecciona una batería de onda cuadrada que cumple con las especificaciones según los cálculos, en este caso con un voltaje de 24V y 305Ah amperios

Figura 22. Batería 24v y 305Ah



Fuente. (Autosolar, 2018)

- **Cálculo del inversor:**

$$Imp_{total} = P_{max} * N^{\circ} \text{ PANELES} = 8,14 \text{ Amp.h} * 2$$

$$Imp_{total} = 16.28 \text{ Amp.h}$$

$$p_{inv} = F.S * E_p = 1,1 * 3,14 \text{ Kw.h}$$

$$P_{inv} = 3.45 \text{ kW}$$

$$345 = \text{W}$$

- **Selección del inversor**

El inversor de onda senoidal modificada cumple con la función de transformar la corriente continua de la batería a corriente alterna, véase en la *Figura 17*.

- **Cálculos y selección de cables, accesorios y elementos de protección**

Selección de cable de corriente continua es:

$(V_A - V_B) \Rightarrow$ Caída de tensión máxima admisible = $1\%(24V) = 0,24$

$S = 2 * L * I / 56 * (V_A - V_B)$

$L \Rightarrow$ La longitud de la conducción = **8m**

$I \Rightarrow$ La intensidad = **5,22 Amp**

$$S = \frac{2 * 8 * 5,22}{56 * 0,24} S = 6,21 \text{ mm}^2$$

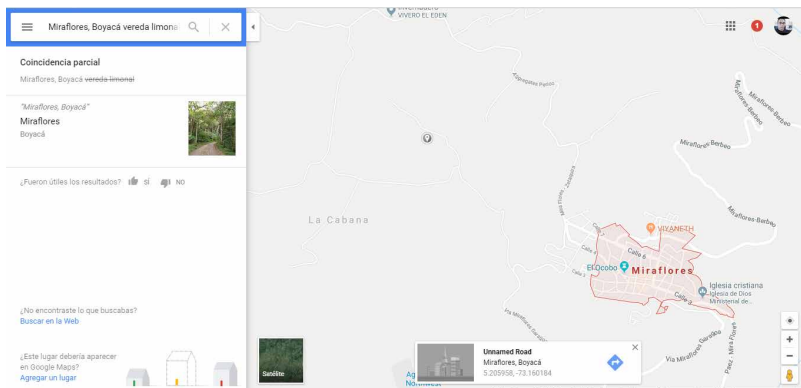
De acuerdo a este cálculo se utilizará un cable standard de véase figura 20.

4.4.3 Sistema de bombeo por medio de energía fotovoltaica

4.4.3.1 Localización

El sistema se desarrolla en la vereda de Limonal en el municipio de miraflores Boyacá, con coordenadas (5.205958, -73.160184).

Figura 23. Ubicación vereda Limonal



Fuente: (Google maps, 2018)

4.4.3.2 Cálculos y selección de componentes

El consumo energético se basa de acuerdo a las horas en que se utiliza la bomba de 2 hp de fuerza (1471 watts) con un caudal de 140 L/ min, se deberá llenar los 5 tanques que completan 1000 Litros llenados en 72 minutos (1,2horas). El tiempo de uso de la bomba, trabajando con energía alterna (AC) de 110v a 220v la cual consumirá 1765,2w/día y un consumo de 52956w/mes.

El cálculo de la Hora solar pico (Hsp) promedio es el siguiente:

4.32 Wh/m2/DIA

El consumo diario de la bomba centrífuga de 2 hp es de:

1,2 h/día

Potencia real 1471,4 w

1765,68 Wh/día

El consumo medio de corriente es de:

73,57 Ah/día

Tabla 6. Cálculo de la energía generada por los módulos y energía total

Energía de consumo (w)	Porcentaje de eficiencia	Energía generada (w)	Energía extra (w)	Energía total (w)
1765,68	0,20	8828,4	441,42	1932,5

Fuente: *Elaboración autores*

- **Cálculo de paneles solares:**

Potencia generada de los paneles: energía diaria/ HPS

$$W = 1,7\text{kw}/4,5\text{kw} = 377\text{w } w > 200\text{ w}$$

Se necesita un sistema de voltaje de 24v

El sistema tendrá una inclinación para los paneles de 5° con dirección al norte basado en la latitud de la ubicación.

Tabla 7. Sistema de Inclinación

Potencia pico del panel (w)	Horas solares pico (whm2/día)	Tensión nominal del panel (v)	Tensión pico (v)	Energía diaria del panel (wh/día)	Número de paneles
250	4,32	30,59	24	1376,55	2

Fuente. Elaboración autores

Tabla 8. Cálculo de paneles

Voltaje nominal	Voltaje del panel	Número de paneles en serie	Número de paneles en paralelo
24	30,59	2	1,00

Fuente: Elaboración autores

- **Selección de panel solar**

Véase en la Figura 30

Para el cálculo de la corriente corregida y de la corriente de diseño se basa en la siguiente ecuación:

$$Qm = \frac{L}{V}$$

Donde

Qm = es el consumo medio de corriente diaria

L= energía real necesaria

V = tensión de trabajo

Para este sistema no se requiere de inversor ya que la bomba trabaja directa a CC por lo que se seleccionan los siguientes paneles:

- **Cálculo del regulador**

Tabla 9. Cálculo del regulador

% de seguridad del regulador	Número de paneles en paralelo	Corriente corto circuito del panel (a)	Corriente necesaria para el regulador (a)	Número de reguladores
1,2	1,00	8,79	10,548	1

Fuente: Elaboración autores

- **Selección del regulador**

Se selecciona un regulador de 10 A

Figura 24. Regulador de 10 A



Fuente. (monsolar, 2018)

- **Cálculo de baterías y cable**

Tabla 10. Cálculo baterías

Consumo total Ah corregido (Ah/día)	Días de autonomía	Máxima profundidad de descarga	Corrección por temperatura	Capacidad necesaria de la batería (ah)	Capacidad de la batería seleccionada (ah)	Baterías en paralelo	Número de baterías en serie
83,41	1,00	0,90	0,9	102,98	0,00	0,00	4

Fuente. Elaboración autores

Tabla 11. Cálculo cable

Consumo total a-h (w)	Factor de rendimiento de cableado	Factor de rendimiento de la batería	Hsp (wh/m2/día)	Consumo total Ahcorregido (Ah/día)	Corriente de diseño (A)
73,57	0,98	0,9	4,32	83,41269841	19,308495

Fuente. Elaboración autores

- **Selección de baterías y cables**

Una batería de gel de 24 voltios véase en la *Figura 41*

El rendimiento de la batería que es igual a los amperios-hora que se puede descargar dividido por los que se han utilizado para cargar.

El cableado del sistema puede variar de 0,95 a 0,99 por lo que se selecciona 9,8 para que las caídas de tensión sean menores del 3% (factor > 0,97) en cualquiera de los circuitos del sistema

- **Cálculos de diseño de bombeo**

Determinamos los elementos que contienen la biblioteca SKATE PARK para su iluminación y la activación de sus fuentes que poseen sistema de bombeo para generar fuentes de chorro.

Tabla 12. Cálculo diseño de bombeo

Potencia	Tensión
< 1,5 kw	12v
(1,5 kw - 5 kw)	24 v - 48v
> 5 kw	48 v - 120 v
Tensión pico del sistema (v)	24
Factor de seguridad (%)	2
Porcentaje de eficiencia (%)	20,0
Energía extra (%)	25
Potencia del panel (w)	250
Tensión nominal (v)	30,59
Corriente a pn (v)	8,17
Tensión en circuito abierto (v)	37,59
Corriente de corto circuito (a)	8,79
Porcentaje de seguridad al regulador (%)	20,00
Corriente nominal del regulador (a)	
Máximo porcentaje de descarga (%)	90,00
Días de autonomía batería (días)	1,00
Capacidad de la batería (ah)	
Factor de rendimiento del cableado	0,98
Factor de rendimiento de las baterías	0,90
Tensión de la batería (v)	
Coeficiente de seguridad	0,80

Fuente. Elaboración autores

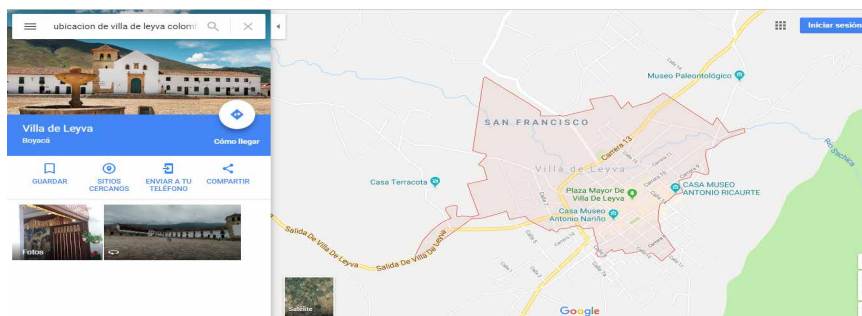
4.4.4 Torre de iluminación solar fotovoltaico portátil

4.4.4.1 Localización

La torre de iluminación solar fotovoltaica portátil se desarrollará en la vereda Ricaurte, municipio de Villa de

Leyva, Departamento de Boyacá Colombia, con coordenadas (5.633128632863574, -73.52201846110248).

Figura 25. Ubicación de Villa de Leyva en Colombia



Fuente: (Google maps, 2018)

4.4.4.2 Cálculos y selección de componentes

El cálculo de la Hora solar pico (HSP) promedio es el siguiente:

$$\text{HSP} = 5.04 \text{ KWh/m}^2$$

Para establecer el consumo eléctrico por día, se implementan 4 reflectores de 1000 watts cada uno, por lo tanto:

Reflectores: $1000\text{W} * 4 = 4000 \text{ W}$ pero en las especificaciones técnicas, los reflectores tienen un consumo máximo de 6000 W

Consumo total * horas de uso = $6000 \text{ W} * 6\text{h} = 36 \text{ KW}$ consumo en un día

- **Cálculo de paneles solares**

$$E = E_T / R$$

$$R = 1 - [(1 - k_b - k_c - k_v) k_a N / P_d] - k_b - k_c - k_v$$

R=Rendimiento del sistema de almacenamiento

Kb= coeficiente de pérdidas por rendimiento del acumulador

Ka= coeficiente de auto descarga

Kc= Coeficiente de pérdidas del inversor

Kv= Coeficiente que agrupa otras pérdidas

EP= Energía que deben producir los paneles.

E= Demanda de energía diaria

PP=Rendimiento por pérdidas en el controlador de carga y el panel.

$$E_p = \frac{\text{CONSUMO ELECTRICO}}{HSP} = \frac{36 \text{ KW}}{5.040 \text{ KWh/m}^2} = 7.142 \text{ KW potencia que debe generar el panel.}$$

Ep = = = 7.142 KW potencia que debe generar el panel.

Ep= 7.142 KW

Et= 36 KW

N= días de autonomía = 2

Pd= 50%- =0.5

Ka= 0.005 Kb=0.05 Kc= 0 no hay inversor

Kv= 0.05

$$R = 1 - [(1 - 0.05 - 0.05)0.005*2/0.5]-0.05-0.05 = 0.882$$

$$E = E_T/R$$

$$E = \frac{36 \times 10^3 W}{0.882} = 40816.32 W$$

$$\text{No de paneles} = E_P / [P(HSP)]$$

$$\text{Calculo \# de paneles} = \frac{7.142 \text{ Kw}}{0.25 \text{ Kw} * 5,040 \text{ Kwh/m}^2} = 5.668 \text{ aprox} = 6 \text{ paneles}$$

- **Selección de paneles solares**

El panel seleccionado es mono cristalino, silicio puro con soldadura de plata con recubrimiento para soportar impacto o caídas, marco en aluminio y conectores MC4, con especificaciones de:

$$P_m = 250 \text{ w}$$

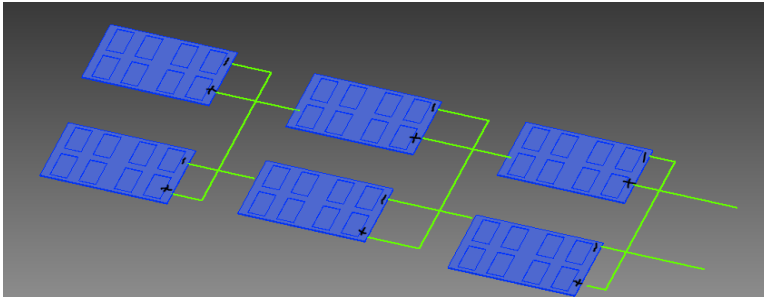
$$V_{mp} = 29.28 \text{ V}$$

$$I_{mp} = 8.53 \text{ A}$$

$$V_{oc} = 36.6 \text{ V}$$

$$I_{SC} = 10.23 \text{ A}$$

Figura 26. Conexión de paneles



Fuente: Elaboración autores

- **Cálculo del regulador**

Se tiene una configuración de 1500W, 48 V

$$I_{SC} = 10,23 \text{ A} * 3 \text{ filas} = 30.69 \text{ A}$$

Se asume un factor de seguridad de 1.25

$$30.69 \text{ A} + 1.25 = 31.94 \text{ Amperios}$$

- **Selección del regulador**

Regulador seleccionado:

Corriente: 10A / 20A / 30A / 40 A

Tensión: 12V/24V/48V véase en la *Figura 21*

- **Cálculo de baterías**

Dimensionamiento de batería

Días de autonomía (N) = 1

$$C_u = EN [W.h]$$

$$Cu = 40816.32 W * 1$$

$$Cu = 40816.32 Wh$$

$$C_u = \frac{40816.32 Wh}{48 V} = 850.3 Ah$$

Capacidad utilizable de la batería

$$C = C_u / Pd$$

$$Cu = \frac{850.3}{0.7} = 1214.7 Ah$$

6 baterías de 12v – 210 Ah en paralelo 24 v 1260 Ah

- **Selección de la batería**

Véase en la *Figura 16*

Capacidad nominal de la batería

Capacidad nominal del banco de baterías = 210 Ah

Profundidad de descarga = 0.7

Capacidad corregida = capacidad nominal / profundidad de descarga

Capacidad corregida = 210 Ah / 0.7 = 300 Ah

- **Selección del inversor**

De acuerdo a las cargas en c.a. se tiene en cuenta un factor de seguridad según el tipo de reflectores de 1000W y la cantidad No. 4 se elimina la necesidad de tener un inversor para un sistema de iluminación. Se conecta los reflectores directamente al controlador de carga y descarga solar.

- **Cálculo de los cables**

La fórmula general para el cálculo de sección de cable para continua es:

$$S = \frac{L \cdot I \cdot \gamma}{(V_A - V_B)} \cdot 10^{-6}$$

Siendo:

$L \Rightarrow$ La longitud de la conducción

$I \Rightarrow$ La intensidad

$\gamma \Rightarrow$ Resistividad o resistencia específica

$(V_A - V_B) \Rightarrow$ Caída de tensión máxima admisible

$$S = 2 * 1 * 11.31 / 56 * 0.48 = 1.68 mm^2$$

Para mayor seguridad se toma un cable de 2.5 mm²

Se tiene en cuenta que el sistema va a estar expuesto al aire libre por lo que se toma de tipo C XLPE3

- **Selección de los cables**

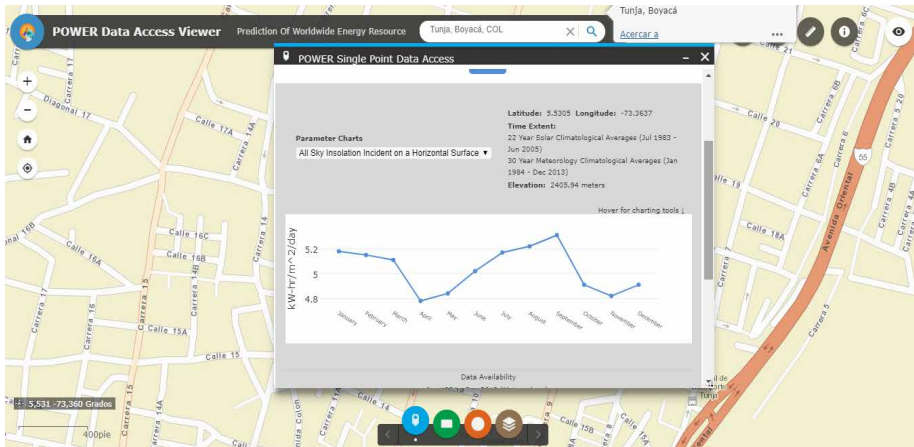
Para toda la instalación vamos a utilizar un cable tipo PV ZZ-F, de cobre, fabricado especialmente para instalaciones fotovoltaicas, pues son cables unipolares con doble aislamiento y con una gran resistencia a la intemperie, que están especialmente concebidos para este tipo de proyectos, véase en la *Figura 18*

4.4.5 Refrigerador solar fotovoltaico para aparta estudio en Tunja

4.4.5.1 Localización

El refrigerador se desarrollará en la ciudad de Tunja, Departamento de Boyacá, Colombia con coordenadas (5.5303,-73.3637).

Figura 27. Tunja - Boyacá



Fuente: (La nasa, 2018)

4.4.5.2 Cálculos y selección de componentes

El cálculo del Hsp promedio es el siguiente:

$$\text{HSP: } 5,04 \text{ KWh/m}^2$$

El consumo eléctrico promedio mensual es:

$$0,998677249 \text{ w}$$

- **Cálculo de paneles solares**

Las pérdidas son:

R - rendimiento del sistema de almacenamiento		
kb	coeficiente de perdida por rendimiento de acumulado	0,5
ka	Coeficiente de auto descarga	0,005
kc	Coeficiente de pérdida de inversor	0
kv	Coeficiente que agrupa otras perdidas	0,15
N	Días de autonomia	2
Pd	Descarga máxima	0,5
Et	2,28284	
R	0,343	
E	6,655510204	

$$R = 1 - \left[\frac{(1 - Kb - Kc - Kv)KaN}{Pd} \right] - Kb - Kc - Kv$$

Voltaje del sistema

24 v

250 W

0,183 kW

Monocrystalino 60 células 250 W

Número de paneles consumo mensual

Potencia panel * Hsp

5,457252725

6 paneles solares

6 filas

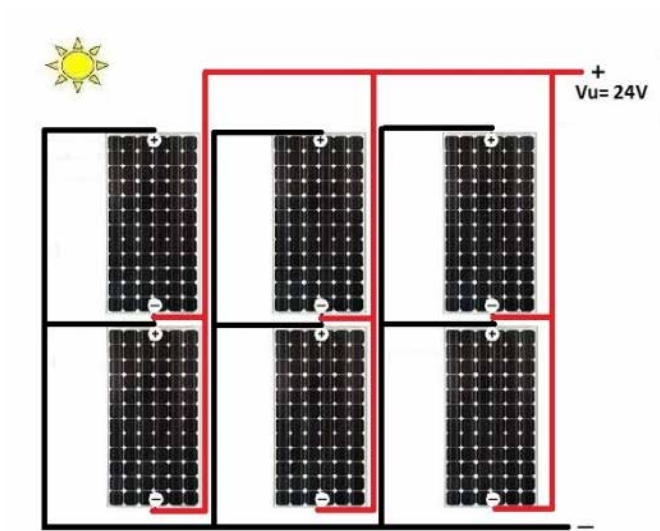
1500 W

Item	Número De Paneles	Potencia Unitaria (Kw)	Precio Unitario	Precio Total
1	6	250 w	586.319	3'517.914

- Selección de paneles solares

consumo electrico de un apartaestudio					
	Cantidad	Horas x día	Potencia	consumo de energia bimestral	mes
Tv Eléctrico	1	4	220	0,88	26,4
Bombillos	4	5	12	0,24	7,2
Estufa eléctrica	1	0,45	450	0,2025	6,075
Tostadora	1	0,2	0,5	0,0001	0,003
Computador Portatil	1	2	0,12	0,00024	0,0072
Total mes				1,32284	39,6852
Consumo mensual	151	Kw/mes	\$/kWh		
	30	mes	542,62		
	5,033333333	Kw	21533,9832		

Figura 28. Panel solar de 24v



Fuente: (Amazon, 2018)

Tabla de características

Características eléctricas

STC	STP250S-20/Wd	STP245S-20/Wd	STP240S-20/Wd
Máxima potencia STC (Pmax)	250 W	245 W	240 W
Tensión óptima de operación (Vmp)	30,7 V	30,5 V	30,2 V
Corriente óptima de operación (Imp)	8,15 A	8,04 A	7,95 A
Tensión en circuito abierto (Voc)	37,4 V	37,3 V	37,2 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	8,63 A	8,52 A	8,43 A
Eficiencia del módulo	15,4%	15,1%	14,8%
Temperatura de operación	-40 °C a +85 °C		
Tensión máxima de sistema	1000 V DC (IEC)		
Corriente máxima de fusible en serie	20 A		
Tolerancia de potencia	0/+5 %		

STC: Irradiancia 1.000 W/m², temperatura del módulo 25 °C, AM=1,5;
Simulador solar AAA mejor de su clase (IEC 60904-9) utilizado, tolerancia de medición de potencia: +/- 3%

NOCT	STP250S-20/Wd	STP245S-20/Wd	STP240S-20/Wd
Máxima potencia NOCT (Pmax)	183 W	180 W	177 W
Tensión óptima de operación (Vmp)	27,9 V	27,8 V	27,7 V
Corriente óptima de operación (Imp)	6,56 A	6,47 A	6,40 A
Tensión en circuito abierto (Voc)	34,4 V	34,3 V	34,2 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	6,98 A	6,91 A	6,83 A

NOCT: Irradiancia 800 W/m², temperatura ambiental 20 °C, AM=1,5, velocidad del viento 1 m/s;
Simulador solar AAA mejor de su clase (IEC 60904-9) utilizado, tolerancia de medición de potencia: +/- 3%

Características de temperatura

Temperatura Nominal de Operación de Célula (NOCT)	45±2°C
Coefficiente de temperatura de Pmax	-0,44 %/°C
Coefficiente de temperatura de Voc	-0,34 %/°C
Coefficiente de temperatura de Isc	0,060 %/°C

Características mecánicas

Célula solar	Silicio monocristalino 156 x 156 mm (6 pulgadas)
Número de células	60 (6 x 10)
Dimensiones	1640 x 992 x 35mm (64,6 x 39,1 x 1,4 pulgadas)
Peso	18,2 kgs (40,1 lbs.)

• Cálculo del regulador

Ics	8,63	A		
Nº Paneles	6			
	51,78			
Fs	1,25			
Amperaje	64,725	Corriente Total	70	A

- **Selección del regulador**

Seleccionamos un regulador de 70 amperios y 24 voltios

Regulador de 12/24V y 70 Ah véase en la *Figura 21*

- **Cálculo de baterías**

Cu	EN	13,3110204	Util
Cu	EN	0,55462585	kW
	Voltaje del sistema		
C	Cu	1,1092517	Ah
	Pd	1200	Ah

E: demanda de energía diaria 6.65 w h/día

N: días de autonomía 2d

CU: capacidad útil de la batería 0.554 kw

PD: profundidad de descarga admitida 50 %

- **Selección de batería**

Se selecciona ocho Baterías de Gel para Panel Solar A 12 Voltios de 150 Ah véase en la *Figura 16*

- **Selección de cables y conectores**

Caja de conexiones	Clase IP67 (3 diodos de derivación)
Cables de salida	TUV (2Pfg1 169:2007) 4,0 mm ² (0,006 pulgadas ²), longitudes simétricas (-) 1.000 mm (39,4 pulgadas) y (+) 1.000 mm (39,4 pulgadas)
Conectores	Conectores MC4

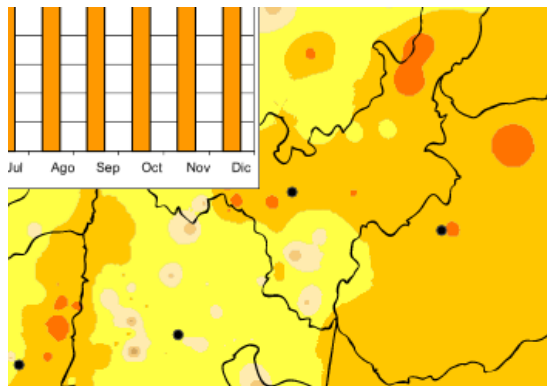
Se seleccionan 6 estructuras de aluminios

4.4.6 Cercado eléctrico por medio de energía fotovoltaica

4.4.6.1 Localización

Lote ubicado a las afuera de Tunja en el departamento de Boyacá donde la radiación solar por mes es de 4,0 a 5,0 Kwh/m² y la hsm promedio es de 5.04 kw.

Figura 29. Ubicación de la zona



Fuente: (Google maps, 2018)

El consumo energético se genera por medio de un impulsor el cual funciona con energía dc y necesita 3w de potencia para su funcionamiento donde el consumo eléctrico diario será de 72w/día ya que se trabaja las 24 horas los días y un consumo mensual de 2160 w/mes.

4.4.6.2 Cálculos y selección de componentes

El cálculo del Hsp promedio es el siguiente:

HSP: 5,0 KWh/m²

- **Cálculo de paneles**

Potencia generada de los paneles: energía diaria/ HPS

$$W = 72\text{w}/5,04\text{kw} = 0.014\text{kw } w < 200 \text{ w}$$

Se necesitará un sistema de voltaje de 12v

Energía necesaria = E = ET (energía total) / R(pérdidas)

Kb= 0,05 coeficiente de pérdidas por rendimiento del acumulador

Ka=0,010 coeficiente de auto descarga

Kv=0,1 coeficiente que agrupa otras pérdidas

Kc=0 coeficiente de perdida inversor

$$R=0,8075$$

$$E = ET/R = 72\text{w}/0.8075 = 89,16 \text{ w/h}$$

CU = EN= Energía*Número de días de autonomía/
Voltaje del sistema

$$CU = (89,16*3)/ 12\text{v} = 22,29\text{ahmp capacidad utilizable de la batería}$$

paneles = energía producida día / (potencia panel* HSd día)

$$\# \text{ paneles} = 89,16 \text{ w/día} / (30\text{w}*5,04) = 0,58 \text{ apromando a 1 panel}$$

- **Selección de paneles solares**

Figura 30. Panel solar de 30w y 12v



Fuente. (Amazon, 2018)

Se deja un solo panel de 30 w el cual funciona a 12v los cuales se regula en el regulador para así bajar la tensión a 12v para ingresar a la batería la carga.

- **Cálculo de las baterías**

pd= profundidad de descarga admitida = 0,5

CU= 22,29 ahmp

C=CU/pd = 22,29 ahmp/ 0,5 = 44,58 amph

Se selecciona 1 baterías de 12v y 45 AH

- **Selección de baterías**

Figura 31. Baterías de 12v y 45Ah



Fuente. (Autosolar, 2018)

- **Cálculo de Regulador**

ISC: corriente corto circuito proveniente del panel

fs.: factor de seguridad del 2.5%

*ISC = 2 Am * 1# fila de panel*

$$ISC = 2 \text{ amp}$$

$$F. S = 25\%$$

$$ISC = 2 \text{ amp} * 1.25 = 2.5 \text{ am} \quad MPPT = 3 \text{ AMP y } 12 \text{ a } 24 \text{ v}$$

- **Selección de regulador**

Figura 32. Regulador de 12v



Fuente. (monsolar; 2018)

- **Selección de Inversor:**

No necesario porque el impulsor trabaja con energía DC

- **Selección de cables y protecciones**

La instalación estará protegida frente a cortocircuitos, sobrecargas y sobretensiones. Se prestará especial atención a la protección de la batería frente a cortocircuitos mediante un fusible, disyuntor magneto térmico u otro elemento que cumpla con esta función y tendrá el siguiente tipo de cable cercado, véase en la Figura 18.

4.4.7 Refrigerador solar fotovoltaico portátil

4.4.7.1 Localización

El refrigerador solar fotovoltaico portátil se desarrollará en Aguazul departamento de Casanare, Colombia con coordenadas (Latitud 5.1708 Longitud -72.5508)

```
-BEGIN HEADER-
NASA/POWER SRB/FLASHFlux/HERRA2/ 0.5 x 0.5 Degree Climatologies
22-year Additional Solar Parameter Monthly & Annual Climatologies (July 1983 - June 2005), 30-year Meteorological and Solar Monthly & Annual Climatologies (January 1984 - December 2013)
Location: Latitude 5.1708 Longitude -72.5508
Elevation from HERRA-2: Average for 1/2x1/2 degree lat/lon region = 1394.68 meters Site = na
Climate zone: na (reference Briggs et al: http://www.energycodes.gov)
Value for missing model data cannot be computed or out of model availability range: -999
Parameter(s):
ALLSKY_SFC_SH_DNN SRB/FLASHFlux 1/2x1/2 All Sky Insolation Incident on a Horizontal Surface (kWh-hr/m^2/day)
PARAMETER JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC ANN
-END HEADER-
ALLSKY_SFC_SH_DNN 5.05 4.80 4.66 4.26 4.23 4.19 4.23 4.22 4.54 4.45 4.41 4.68 4.48
```

4.4.7.2 Cálculos y selección de componentes

El cálculo del Hsp promedio es el siguiente:

HSP promedio anual: 4.48 (kW-hr/m²/day)

El consumo diario se obtiene de los siguientes resultados:

Potencia (watts)	Horas de uso (horas)	Consumo día (kwh)
745,7	10	7,45

- **Cálculo de paneles solares**

Con una pérdida de:

N= 2 días de autonomía

$$P_d = 50\% = 0.5$$

$k_b = 0.05$ *coeficiente de perdidas rendimiento del acumulador* k_a

$= 0.005$ *coeficiente de autodescarga* k_c

$= 0.13$ *coeficiente de perdidas del inversor* k_v

$= 0.1$ *coeficiente que agrupa otras perdidas*

$$R = 1 - [(1 - k_b - k_c - k_v) k_a N / P_d] - k_b - k_c - k_v$$

$$R = 1 - \{(1 - 0.05 - 0.13 - 0.1) * \frac{0.005(2)}{0.5}\} - 0.05 - 0.13 - 0.1 R = 0.705$$

La energía necesaria teniendo en cuenta pérdidas

$$E = \frac{E_r}{R} E = \frac{1660 \text{ Wh}}{0.705} E = 2354,60 \text{ Wh} = 2,35 \text{ Kwh}$$

$$P_p = 1 - (k_b + k_v) = 1 - (0.05 + 0.1) P_p = 0,85 E_p = \frac{E}{P_p} = \frac{2354,60 \text{ Wh}}{0,85} = 2770 \text{ Wh} \\ = 2,77 \text{ Kwh}$$

El voltaje del sistema: 24 V

El número de paneles en serie de 175 W a 24v
(1580x808x35mm)

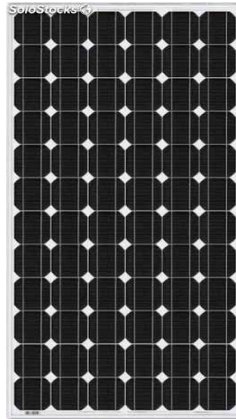
$$N^{\circ} \text{ PANELES} = \frac{E_p}{P * HSP}$$

$$N^{\circ} \text{ PANELES} = \frac{2,77}{(0.175)(4.48)} N^{\circ} \text{ PANELES} = 3,53 \cong 4$$

- **Selección de paneles solares**

Se selecciona paneles con tipo de célula monocristalino con las características de 175w a 24v de Alta Eficiencia, dimensiones 1580 x 808 x 40 mm, peso 14.8 kg, corriente de máxima potencia 4.79 A, $V_{m\acute{a}x}$ 36.50 V, ISC 5.22 A.

Figura 33. Panel solar de 175w y 24v



Fuente. Mercasol 2018

- **Cálculo del regulador**

$$V = 24v$$

$$\begin{aligned} ISC &= 5.22 \text{ Amp} * 4ISC = 20.88 \text{ Amp} \\ ISC_{TOTAL} &= ISC * F.S = 20.88 \text{ Amp} * 1.25 \\ &= 26.1 \text{ Amp} \end{aligned}$$

- **Selección del regulador**

Se selecciona un regulador con una salida de consumo en DC: 12V/ 24V y amperios máximos de carga del regulador de 30ª véase en la *Figura 15*

- **Cálculo de la batería**

$$ISC = 20.88 \text{ Amp.} \cdot hCu = E * N = 2354,60 * 2 = 4709,2 \text{ W.} \cdot hCu = \frac{4709,2 \text{ W.h}}{24V} = 196,21 \text{ Amp.} \cdot h$$

cap. utilizable de la batería



La capacidad nominal de la batería es:

$$C = \frac{Cu}{P_d} = \frac{196,21}{0.5} = 392,43 \text{ Amp.} \cdot h$$

- **Selección de la batería**

Se selecciona una batería de Gel de horas de batería 100Ah y voltaje 24V con duración de 800 ciclos con un peso de 73 Kg

Figura 34. Batería de 100Ah



Fuente. (Autosolar, 2018)

- **Cálculo de inversor**

$$\begin{aligned} Imp_{total} &= P_{max} * N^{\circ} \text{ PANELES} = 4,79 \text{ Amp.} \cdot h * 4 Imp_{total} = 19,16 \\ &= F.S * E_p = 1,08 * 2.77 \text{ Kw.} \cdot h P_{inv} = 2991,6 \text{ W} \end{aligned}$$

- **Selección del inversor**

Se selecciona un inversor de potencia 6000W, un voltaje de trabajo de 24 V, una potencia de salida continua de 3000W y una eficiencia de onda senoidal pura.

Figura 35. Inversor de onda senoidal



Fuente. (Azimut caravaning, 2018)

- **Cálculo de cable**

$$S = 2 * L * I / 56 * (VA - VB)$$

$L \Rightarrow$ La longitud de la conducción = **8m**

$I \Rightarrow$ La intensidad = **5,22 Amp**

$(VA - VB) \Rightarrow$ Caída de tensión máxima admisible = 1%(24v)
= **0,24**

$$S = \frac{2 * 8 * 5,22}{56 * 0,24} S = 6.21 \text{ mm}^2$$

De acuerdo a este cálculo se utilizara un cable standard de

- **Selección de cable, conectores y estructura**

Se selecciona un cable de corriente continua alterna de calibre 10, unos breaker para proteger el circuito de los paneles al regulador y del regulador al inversor de sobretensión continua tipo 2 1000VDC, una estructura horizontal de aluminio

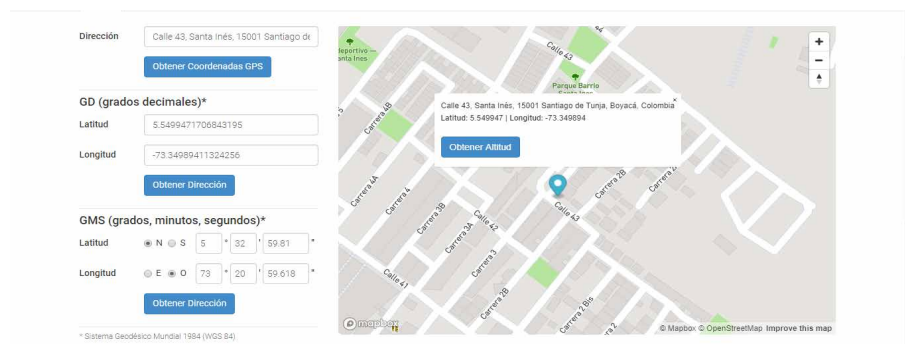
anodizado de superficie plana de 4 paneles con pata telescópica de 15° a 30°

4.4.8 Vivienda interconectada a la red con un consumo de 8kw día en Tunja

4.4.8.1 Localización

La vivienda seleccionada se encuentra ubicada en Tunja, Boyacá, Colombia con Coordenadas (Latitud: 5.5499 Longitud: -73.3499)

Figura 36. Coordenadas Tunja Boyacá



Fuente. (Google maps, 2018)

4.4.8.2 Cálculos y selección de componentes

El cálculo del Hsp promedio es el siguiente:

HSP promedio anual: 5.04 kw/m²

Con consumo diario de la vivienda de 8Kwh/día se obtienen los siguientes resultados:

- **Cálculo de paneles solares**

1. Horas solar pico (HSP): 5.04 kw/m
2. Consumo diario= 8Kw
3. Energía necesaria de los paneles por hora=1.58kwh

$$\dot{W}_l = \frac{8kw}{5.04kw/m}$$

$$\dot{W}_l = 1.58kwh$$

Cálculo de las pérdidas

$$R = 1 - \left[\frac{(1 - Kb - Kc - Kv)KaN}{Pd} \right] - Kb - Kc - Kv$$

Factores de corrección

- R =Rendimiento del sistema de Almacenamiento
- ka =Coeficiente de autodescarga (No aplica porque no se usan baterías) = **0**
- kb =Coeficiente de pérdidas por rendimiento del acumulador= **0.05**
- kc =Coeficiente de Pérdidas del Inversor para inversor senoidal= **0.13**
- kv =Coeficiente que agrupa otras pérdidas. (otros componentes (Diferencia de potencias nominales a potencias reales consumidas), conducción, conexiones), para si las potencias son las realmente consumidas= **0.05**

- N = número de días de autonomía (No aplica porque no se usan baterías) =0
- Pd = Profundidad de descarga= (No aplica porque no se usan baterías) =0

$$R = 1 - \left[\frac{(1 - 0.05 - 0.13 - 0.05) * 0 * 0}{0} \right] - 0.05 - 0.13 - 0.05 = 0.77$$

El rendimiento es del 77%.

El Cálculo la energía necesaria de los paneles por hora teniendo en cuenta las pérdidas.

- **Selección de paneles solares**

Se usarán paneles mono cristalinos debido a la nubosidad de Tunja, véase en Figura 32

Opc.	Número de Paneles	Potencia Unitaria (Kw)	Precio Unitario (Pesos Colombianos)	Dimensiones (Mm)	Precio Total (Pesos Colombianos)
1	6 (24v)	300	870.000,00	1950x992x50	5'220.000,00
2	8 (24v)	200	664.383,58	1580x808x35	5'315.064,00
3	16 (12v)	100	432.920,92	1196x545x35	6'926.734,64

Se selecciona la opción número uno debido a que es la opción que tiene el menor número de paneles, y por ende necesitara menos espacio para su instalación. En cuanto a diferencia económica no es mucho en comparación con la opción 2, pero sin embargo el espacio necesario de nuevo rige esta selección.

Comprobación de la selección:

$$\begin{aligned}\#paneles &= Ep/(P(Hsp)) \\ \#paneles &= 8kw/(0.3(5.02)) \\ \#paneles &= 5.31 \text{ paneles} \approx 6 \text{ paneles}\end{aligned}$$

Voltaje del sistema: 48V. Debido a la configuración del sistema de paneles se tendrá un voltaje de 48v por la suma de las dos columnas de paneles que están en paralelo, donde cada una es de 24V. De 48v debido a la potencia del sistema.

La instalación de los paneles se realizará de tal forma que se conjugue la conexión en serio y paralelo de manera en que queden dos columnas en serie de tres paneles en paralelo. Esta configuración se da porque es la forma más eficiente de ubicar los paneles y debido al tejado de la locación.

Voltaje del sistema= 48v, potencia total= 1800w

- **Cálculo del regulador**

$$Isc = 9.83A * 3 \text{ paneles} = 29.49A$$

Aplicando un factor de seguridad de 1.25

$$Isc(Total) = Isc * F. s$$

$$Isc(Total) = 29.49 * 1.25 = 36.86A$$

36.86A es la máxima corriente de la que protegerá el regulador al sistema.

Se escoge el regulador 48V 50A PWM victron Blue solar

- **Selección del regulador**

El regulador que se selecciona es de 48 v y una corriente de corto circuito de 5,72 A*

Tabla 8. Características eléctricas del panel solar de 24 v a 300w

PERFORMANCE UNDER STANDARD TEST CONDITIONS (STC)*

		SW 290	SW 300
Maximum power	P_{max}	290 Wp	300 Wp
Open circuit voltage	U_{oc}	39.6 V	40.0 V
Maximum power point voltage	U_{mp}	31.9 V	32.6 V
Short circuit current	I_{sc}	9.75 A	9.83 A
Maximum power point current	I_{mp}	9.20 A	9.31 A
Module efficiency	η_m	17.30 %	17.89 %

Measuring tolerance (P_{max}) traceable to TUV Rheinland: +/- 2% (TUV Power controlled, ID 0000039351)

*STC: 1000W/m², 25°C, AM 1.5

Tomado de SunFields Europe, disponible en: https://www.sfe-solar.com/wp-content/uploads/2015/10/SolarWorld-SW290-300-Mono_EN.pdf

- **Cálculo y Selección del inversor**

De acuerdo a las cargas en C.A. tenga en cuenta un factor de seguridad

- Potencia máxima que generan los paneles solares: 1800W
- Potencia con un factor de seguridad del 20%: 2160W
- Corriente de corto circuito máxima del sistema: 36.86A
- Voltaje del sistema: 48v

Opción	Marca	Tipo De Inversor
1	Solaredge	Onda senoidal pura

Se selecciona la opción 1, el inversor SE2200H, debido a que la potencia requerida es de 2160w y el inversor ofrece 2200w,

con factor de seguridad del 20 %. A continuación se presentan las características del inversor:

Figura 37. Ficha técnica del inversor SE2200H.

	SE2200H	SE3000H	SE3500H	SE3680H	SE4000H	SE5000H	SE6000H	
SALIDA								
Potencia nominal de salida CA	2200	3000	3500	3680	4000	5000 ⁽¹⁾	6000	VA
Máxima potencia de salida CA	2200	3000	3500	3680	4000	5000 ⁽¹⁾	6000	VA
Tensión de salida CA (nominal)					220 / 230			Vac
Rango de tensión de salida CA					184 - 264,5			Vac
Frecuencia CA (nominal)					50 / 60 ± 5			Hz
Corriente máxima de salida continua	10	14	16	16	18,5	23	27,5	A
Monitorización de red, protección contra funcionamiento en isla, umbrales configurables por países					Sí			
ENTRADA								
Máxima potencia de CC	3400	4650	5425	5700	6200	7750	9300	W
Sin transformador, sin puesta a tierra					Sí			
Tensión máxima de entrada					480		Vdc	
Tensión de entrada CC nominal					380		Vdc	
Corriente máxima de entrada	6,5	9	10	10,5	11,5	13,5	16,5	Adc
Protección contra polaridad inversa					Sí			
Detección de aislamiento de fallo de toma de tierra					Sensibilidad de 600 kΩ			
Rendimiento máximo del inversor					99,2		%	
Rendimiento europeo ponderado	98,3		98,8			99		%
Consumo de energía durante la noche					< 2,5		W	
CARACTERÍSTICAS ADICIONALES								
Interfaces de comunicación compatibles	RS485, Ethernet, ZigBee (opcional), Wifi (opcional), telefonía móvil (opcional)							
Gestión inteligente de la energía	Limitación de la exportación, gestión de la energía del hogar, aplicaciones StorEdge							
CUMPLIMIENTO DE NORMAS								
Seguridad	IEC-62109-1/2, AS-3100							
Normas sobre conexión a la red	AS-4777, VDE-AR-N-4105, VDE 0126-1-1, UTE C15-712, G83/2, G59/3, CEI-021, EN 50438, IEC61727, IEC62116, ÖNORM, TF3.2.1, C10-11, NRS 097-2-1							
Emissiones	IEC61000-6-2, IEC61000-6-3, IEC61000-3-11, IEC61000-3-12, FCC, parte 15, clase B							
ESPECIFICACIONES PARA LA INSTALACIÓN								
Salida CA – Diámetro cable compatible					9 - 16		mm	
CA – Sección del cable compatible					1 - 16		mm²	
Entrada CC	1 x MC4			2 x pares MC4				
Dimensiones (Al. x An. x Pr.)					280 x 370 x 142		mm	
Ruido					< 25		dBA	
Peso	7,8					9	10,6	kg
Refrigeración					Convección natural			
Rango de temperatura de trabajo					-20 a +60 ⁽¹⁾ (-40 °C opcionalmente)		°C	
Grado de protección					IP65 – Exteriores e interiores			

⁽¹⁾ 4600 VA en Alemania

Fuente: Tomado de inversores monofásicos SolarEdge, disponible en: <https://autosolar.es/inversores-de-red-monofasicos/inversor-conexion-red-2200w-solaredge-monofasico>

- **Selección del contador y estructura**

Se selecciona un contador bidireccional Monofásico A150 y una estructura coplanar.

- **Selección de los cables, accesorios y elementos de protección**

Elemento	Tipo	Cantidad
Cable paneles solares (4mm ²)	AWG calibre 11 Centelsa	100 mt
Caja de conexiones	IP67, de 3 diodos	1
Conectores	MC4	6
Cableado regulador <6mm ²	AWG calibre 9	20
Cableado inversor (1-16 mm ²)	AWG calibre 6	20
Conectores	MC4	1
Breaker AC	(al 125% de I) 50A- monofásico	1
Breaker DC	(al 125% de I) 15A	1

Bibliografía

Administración de proyectos. (2018). Componentes de una instalación solar fotovoltaica [Figura]. Obtenido de <http://imec9aq1.blogspot.com/p/soporte-tecnico.html>

Amazon. (2018). Paneles solares. Obtenido de: <https://www.amazon.es/gp/aws/cart/add.html?ASIN.1=B0779DJ1WY&Quantity.1=1&AWSAccessKeyId=AKIAII7ZJQF3ZHFUWLEA&AssociateTag=replafoto2460-21>

Autosolar. (2018). Batería 12V 260Ah Formula Star [ilustración]. Obtenido de: <https://autosolar.es/baterias-plomo-abierto-12v/bateria-12v-260ah-formula-star>

Autosolar. (2018). Batería OPzS 24V 305Ah Transparente Tudor-Exide [ilustración]. Obtenido de: <https://autosolar.es/baterias-estacionarias-opzs-24v/bateria-opzs-24v-305ah-transparente-tudor-exide>

Azimut caravaning. (2018). Inversor 24V/230V, 1500W, onda sinusoidal modificada, soft-start. TUV. [Ilustración]. Obtenido de: <https://www.azimutcaravaning.es/inversor-24v-230v-1500w-onda-sinusoidal-modificada-soft-start-tuv.html>

Benavides, H., Simbaqueva, O., & Zapata, H. (2017). Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.

Campen, V B., Guidi, D., & Best, G. (2000). Energía solar fotovoltaica para la agricultura y el desarrollo rural sostenibles. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Cepeda, J., & Sierra, A. (2017). Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones. Trabajo de grado de pregrado: Universidad Santo Tomás.

Comisión de Regulación de Energía y Gas. (17 de noviembre de 2019). Obtenido de: <https://www.creg.gov.co/>

Google maps. (2018). Tunja Boyacá. Obtenido de: <https://www.google.com/maps/place/Parque+La+Biblioteca+-+Skatepark+tunja/@5.5458768,-73.3596768,18z/data=!4m2!1m1!4m1!1m6!1m2!1s0x8e6a7c2e897fba5b:0xac9fda7e6b9aa68c!2zVHVuamEsIEJveWFjw6E!2m2!1d-73.3575572!2d5.5446422!1m6!1m2!1s0x8e6a7c3b4e1ff83d:0xdb7>

Google maps. (2018). Tunja-Boyacá [Figura]. Obtenido de: <https://www.coordenadas-gps.com/>

Google maps. (2018). Ubicación de villa de leyva. Obtenido de: <https://www.google.com.co/maps/place/Villa+de+Leyva,+Boyac%C3%A1/@5.6364994,-73.5358133,15z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x8e41d70e3c78a119:0x63446b78661193dd!8m2!3d5.636499!4d-73.527058>

Grupo de Energía de Bogotá. (15 de noviembre de 2019). Obtenido de: <https://www.grupoenergiabogota.com/eeb/index.php/transmision-de-electricidad/sector-energetico-en-colombia>

Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no interconectadas. (17 de noviembre de 2019). Obtenido de: <http://www.ipse.gov.co/ipse/quienes-somos>

Kosow, I. (1991). *Máquinas eléctricas y transformadores*. Ciudad de México: Hispanoamericana.

La nasa. (2018). Tunja, Boyacá [ilustración]. Obtenido de: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Machado, M., & Martínez, D. (1994). El concepto de energía en los libros de texto: de las concepciones previas a la propuesta de un nuevo sublenguaje. *Investigación y experiencias didácticas*, 12(3), 369-380.

Madrid Solar. (2006). *Guía de la energía solar*. Madrid: MadridSolar.

Marín, E. (2008). Escuchando la luz: breve historia y aplicaciones del efecto fotoacústico. *Lapen*, 209-215.

McGraw-Hill. (20 de octubre de 2019). Obtenido de: <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>

Ministerio de Minas y Energía. (18 de octubre de 2019). Obtenido de: <https://www.minenergia.gov.co/inicio>

Monsolar. (2018). ¿Qué es y qué hace un regulador de carga solar? [Figura]. Obtenido de: <https://www.monsolar.com/blog/que-es-y-que-hace-un-regulador-de-carga-solar/>

Mukherjee, P., & Sengupta, T. K. (2020). Design and Fabrication of Solar-Powered Water Pumping Unit for Irrigation System. In Computational Advancement in Communication Circuits and Systems (pp. 89-102). Springer, Singapore.

Núñez, M., & Salazar, C. (2014). *Diseño y construcción de un sistema eficiente de alimentación solar mediante acumuladores de energía, para un vehículo eléctrico*. Trabajo de grado de pregrado: Universidad Técnica de Cotopaxi.

Oliver, A., Neila, F., & García Santos, A. (2012). Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica. *Materiales de Construcción*, 62, 131-140. doi:10.3989/mc.2012.58010

Pardos, F. (2002). *Robótica y energía solar*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

Perpiñan, O. (2018). *Energía Solar: Fotovoltaica*. Madrid: Creative Commons. Obtenido de: <https://github.com/oscarperpinan/esf>

Renovables del este. (2018). Panel Solar Fotovoltaico 270W 24V Policristalino [Figura]. Obtenido de: <http://renovablesdeleste.com/producto/panel-solar-fotovoltaico-270w-24v-policristalino/>

Resolución 008: Por la cual se establecen las reglas para la Liquidación y Administración de Cuentas por Uso de las

redes del Sistema Interconectado Nacional asignadas al LAC. (Comisión de Regulación de Energía y Gas 12 de febrero de 2003).

Resolución 055: Por la cual se regula la actividad de generación de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional. (Comisión de Regulación de Energía y Gas 28 de diciembre de 1994). Obtenido de: <http://apolo.creg.gov.co/publicac.nsf/1aed427ff782911965256751001e9e55/f631938536ce5f010525785a007a5da4?OpenDocument>

Resolución 079: Por la cual se resuelve el Recurso de Apelación presentado por INVERSIONES Y COMERCIALIZADORA DE ENERGÍA S.A. E.S.P., contra el Acuerdo 027 de 1999 del Consejo Nacional de Operación. (Comisión de Regulación de Energía y Gas 15 de diciembre de 1999).

Rezk, H., Abdelkareem, M. A., & Ghenai, C. (2019). Performance evaluation and optimal design of stand-alone solar PV-battery system for irrigation in isolated regions: A case study in Al Minya (Egypt). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 36, 100556.

Rincón, N. (2014). Energía nuclear: ventajas y peligros. *Hipótesis, Apuntes científicos uniandinos*, 16, 66-71.

Rodríguez Borges, C. G. (2011). Compensación del número de paneles y baterías en los sistemas fotovoltaicos autónomos [Figura]. Dirección de Investigación y Postgrado, UNEXPO.

Rúa, E., González, A., Granados, A., & Ramírez, R. (2019). Diseño Estructural de Transporte para Sistema de Bombeo Portátil Activado con Energía Solar Fotovoltaica para el Departamento de Boyacá. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 9(2).

Tecnología. (2018). Paneles solares [Figura]. Obtenido de: <http://www.areatecnologia.com/electricidad/paneles-solares.html>

Tello, A. (Julio de 2010). Sistema de Seguimiento Automático del Sol para Optimizar la Captación de Energía en Celdas Fotovoltaicas. Obtenido de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/3887/1/T-ESPEL-0730.pdf>

Tello, A. (julio de 2010). Sistema de Seguimiento Automático del Sol para Optimizar la Captación de Energía En Celdas Fotovoltaicas [Figura]. Obtenido de: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/3887/1/T-ESPEL-0730.pdf>

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (20 de noviembre de 2019). Obtenido de: <https://www.superservicios.gov.co/>

Unidad de Planeación Minero Energética. (17 de noviembre de 2019). Obtenido de: <https://www1.upme.gov.co/Paginas/default.aspx>

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA DE DISEÑO MECÁNICO PARA BOMBEO PORTÁTIL

Saúl Andrés Hernández Moreno

Carlos Rojas

Ángela González Amarillo

Leonardo Cely Güezguán

Edwin Torres Díaz

5.1 Introducción

El objetivo principal a la hora de elaborar un diseño o mejorar un producto, es determinar cuál es el impacto que este generará a la sociedad, a un colectivo específico o, bien sea, a un cliente en particular que requiera suplir una necesidad. Para tal efecto, se debe primero identificar las carencias o insuficiencias que tiene dicho sector y qué tipo de provecho obtendrían con la utilización del mismo. Se plantea entonces una idea central e innovadora que describa las características o funciones deseadas; este ha sido el concepto base del diseño, ya sea mecánico o de cualquier otra rama a través del tiempo. Es verdaderamente complicado que los estándares de esa base cambien, por lo cual es algo que se ha determinado en su concepto más propio.

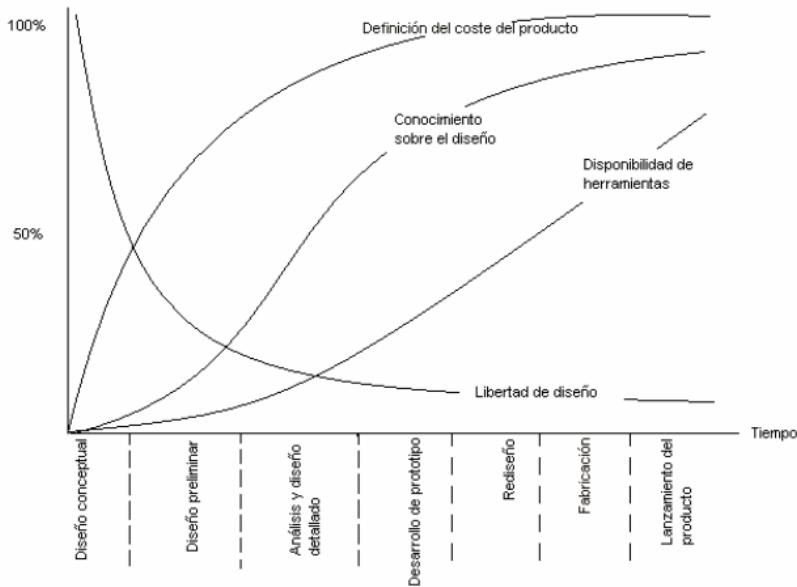
Con todos los avances tecnológicos sobre el diseño y las diferentes ayudas computacionales presentes hoy en día, se hace una clasificación de tres tipos de modelos, los cuales son: *modelo descriptivo*, *modelo prescriptivo*, *modelo cognitivo* y *modelo computacional*. El primero habla o presenta las propuestas que se idearon para ese producto, el segundo ya nos indica la acción de realizar las propuestas presentadas. Por último, los dos modelos propuestos son el estudio de cómo entenderlo y la capacidad de automatizarlo.

En la ingeniería por medio de toda la matemática y diferentes conceptos de ciencias se ha buscado perfeccionar la técnica del diseño, pero es de importancia decir que así mismo como tiene una evolución destacada también tiene un fuerte desequilibrio, esto es, porque se preocupa más por un análisis detallado de un producto nuevo.

El concepto de síntesis indica que se puede tomar como base la retro ingeniería que tiene como función tomar ideas que existen y poder mejorarlas, así se innova en diseño e ideas. En conclusión, no siempre es necesario crear algo nuevo si se puede mejorar un producto.

El método de diseño conceptual es una técnica moderna que usa como principio el concepto de síntesis anteriormente mencionado. En este punto se considera que el factor más importante a tener en cuenta es la creatividad o imaginación, las decisiones a tomar en este diseño son de crucial importancia por lo que con un buen concepto se podría llegar a elaborar o mejorar un producto hasta que sea imposible seguir mejorándolo en etapas siguientes.

Figura 1. Tendencia de factores durante desarrollo de productos



Fuente: *research opportunities in engineering design (1996)*

En un profundo estudio de la metodología de diseño conceptual, se puede decir que es el punto base para la creación del producto; se podría llamar fase creativa, se hace una correlación al principio la cual tiene como objeto determinar la calidad del producto con la calidad de la innovación y/o creatividad en el diseño.

Como es lógico, el ingeniero encargado de esta etapa debe tener una preparación previa y conocimiento en el tema. Un factor importante a considerar a la hora de la elaboración de un producto es el tiempo, si toma este como variable en este tipo de metodología se considera como dependiente de los objetivos y especificaciones, es decir, no entra al caso. Pero es de importancia aclarar que la exigente imposición de tiempo en el diseño es un problema, por lo cual la creatividad e imaginación

para el desarrollo va a estar cargado de presión, por lo tanto, una consecuencia podría ser que el diseño no salga tan bien como el esperado.

A continuación, se propone una tabla que indica el esfuerzo creativo necesario en función de los parámetros: objetivos y especificaciones que ha de cumplir un determinado diseño conceptual. (Lloveras, 2007).

Figura 2. Esfuerzos creativos extremos en función de objetivos y especificaciones que ha de tener

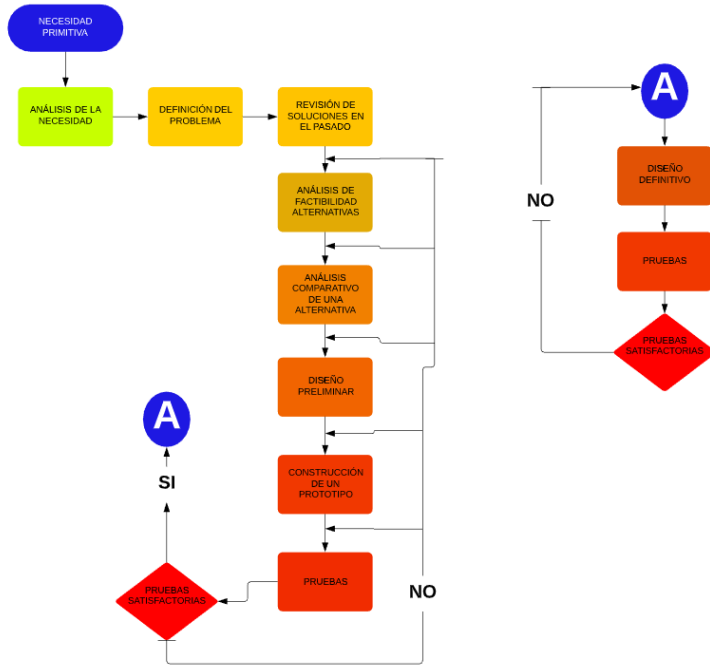
	Gran número de especificaciones restrictivas	Especificaciones poco restrictivas
Objetivos amplios	Esfuerzo creativo medio	Gran esfuerzo creativo
Objetivos reducidos	Esfuerzo creativo mínimo	Esfuerzo creativo medio

Fuente: (Lloveras, 2007)

5.2 Necesidad Primitiva

Para establecer una necesidad primitiva, se tiene un problema que no está bien definido o no está completamente establecido, así mismo los datos son insuficientes o casi nulos. Por otra parte, la situación problemática no es clara y no se conocen las causas que la originan. Esta situación inicial o problemática puede originarse en la necesidad de una mejora, eliminar un daño ambiental o mejorar la calidad; a esto se le llama necesidad primitiva.

Figura 3. Diagrama de flujo necesidad primitiva



Fuente. Elaboración autores

Colombia es uno de los países con mayor producción frutal del mundo por su gran ecosistema. La producción mundial de frutales en fresco asciende actualmente a 15,5 millones de toneladas, de las cuales Colombia contribuye con 13.579 T año (B, S, & CAMACHO-TAMAYO, 2012). La región boyacense se ha caracterizado a través del tiempo en la industria por su gran calidad y amplia variedad de producción de frutos. Uno de los factores que colabora a esto es el clima o nivel de radiación que recibe esta región. De los muchos obstáculos que presentan los agricultores de este sector es la movilidad o capacidad de riego a sus cultivos, es verdad que en el día la radiación solar es bastante favorable, pero en horas de madrugada las heladas son capaces de quemar los cultivos por lo que es necesario un riego constante.

Según el frutícola nacional y el desarrollo de la fruticultura en Boyacá (2006), las especies de más importancia, por el área en cultivo son: guayaba, naranja, pera, curuba y ciruela. El departamento es primero en la producción nacional de caducifolios, curuba, papayuela y ciruela, lo cual indica su vocación y tradición a través de los años en este tipo de cultivos de clima frío. A continuación se muestra en la tabla 1 con la producción frutal en la región boyacense:

Tabla 1. Producción de frutales en la región boyacense (2004)

Especie	Área ha	Producción t	Rendimiento t/ha
1. Aguacate	102	1.326	13
2. Banano	15	75	5
3. Bananito	35	315	9
4. Borojó	3	24	8
5. Brevo	213	1.065	5
6. Chirimoya	80	880	11
7. Ciruela frío	1.055	9495	9
8. Curuba	1.122	16.830	15
9. Dátil	7	60	8.5
10. Durazno	720	7.200	10
11. Feijoa	188	1.128	6
12. Fresa	40	2.080	52
13. Granadilla	84	924	11
14. Guanábana	6	60	10
15. Guayaba	2.047	32.752	16
16. Higo	1	18	18
17. Lima Tahiti	186	2.790	15
18. Lima Pajarito	93	1.209	13
19. Lulo	503	5.030	10
20. Mandarina	431	6.465	15
21. Mango	34	714	21
22. Manzana	443	4.430	10
23. Melón	100	1.200	12
24. Mora	451	2.076	4.6
25. Naranja	1.525	24.400	16
26. Papaya	35	595	17
27. Papayuela	53	371	7
28. Pera	1.303	13.030	10
29. Piña	28	700	25
30. Pitaya	144	1.728	12
31. Toronja	47	864	18
32. Tangelo	47	799	17
33. Tomate de árbol	535	12.305	23
34. Uchuva	114	1.596	14
35. Vid	16	144	9
36. Zapote	27	324	12
Total	11.833	155.002	

Fuente: PEN

Normalmente un cultivo con buena tecnificación cuenta con sistemas de riego por goteo o sistemas de riego automático, hablando de las dimensiones tan grandes de la región, poder instalar estos sistemas, son de gran complejidad y bastante costosos. Por consiguiente, los microempresarios que no cuentan con los recursos financieros, riegan sus cultivos con mangueras, generando el desperdicio de grandes cantidades de agua. El desarrollo económico y social de un país depende de sus posibilidades de alcanzar una producción agropecuaria adecuada a sus necesidades de alimento y tentativamente contar con una producción a otros países (Gurovich, 1985).

Con todos estos datos aclaradores se busca suplir la necesidad del agricultor respecto al riego adecuado de sus siembras frutales; esto mediante un vehículo de remolque para cultivo y riego, activado con energía solar fotovoltaica, todo bajo la norma técnica colombiana NTC 4788, apartado uno; donde especifica los requisitos que se deben cumplir para el funcionamiento y transporte por carretera de vehículos remolcados, con dimensiones, máximos pesos brutos vehiculares y máximos pesos por eje, según su clasificación.

5.3 Análisis de la Necesidad

Una vez enfrentada la necesidad primitiva, se efectúa el análisis de esta, lo cual implica inicialmente dando claridad a una la situación problemática, definiéndola en términos numéricos, mediante indicadores los cuales correspondientes al estado inicial. Posteriormente se analiza la importancia de la necesidad, haciendo referencia a los efectos de la situación existente, es decir, definir si la necesidad es realmente relevante. El análisis de la necesidad puede requerir de análisis estadísticos, de costos de oportunidad, impacto ecológico, impacto social, entre otros. Finalmente, el resultado debe ser una propuesta debidamente sustentada, con el fin de satisfacer la necesidad, así como las condiciones deseables.

En los cultivos frutales boyacenses, el factor principal es poder llevar el agua al lugar de cosecha, una vez realizado este proceso, la prioridad del agricultor es encontrar la manera de llevar ese recurso hídrico a sus campos y poder distribuirla de la manera más uniforme posible para así tener un margen de cosecha exitoso. Los cambios en el clima han obligado a los cultivadores frutales a modificar las áreas de siembra según la disponibilidad de agua y el régimen de siembra (Bautista, Sánchez, & Camacho-Tamayo, 2011). La escasez de los recursos hídricos es un impedimento bastante grande para los agricultores de la región por lo que tendrían que cambiar su área de cultivo conllevando a esto incrementos en gastos de producción, y una región tan rica en suelos como Boyacá no se da en ningún otro lugar. Por lo que se busca un sistema portátil y de bombeo de agua mediante una fuente de radiación. Boyacá presenta una radiación bastante alta en sus Horas Pico de Sol (HPS), siendo así un factor menos por qué preocuparse. Para el correcto proceso de fotosíntesis de las plantas o frutales necesitan una buena hidratación, esto es porque el agua necesaria para un correcto crecimiento representa cerca del 80% del peso de la planta (Copesa, 2019).

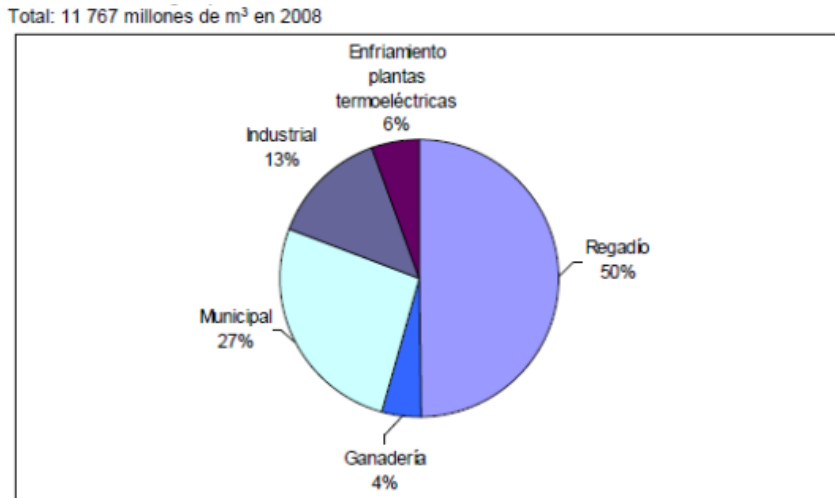
La correcta distribución de agua en un cultivo afecta económicamente y también en la germinación del frutal, todo cultivo necesita un sistema de riego a sus necesidades (Admindefinca, 2019). Por eso se decide hacer uso de una motobomba con una potencia de 1 hp (745,7W) accionada por medio de radiación, esta es una alternativa bastante conveniente gracias a su potencia y cuidado con el medio ambiente ya que no necesita de una instalación en el suelo de cosecha ni tampoco una acción por medio de combustibles fósiles. La utilidad de este proyecto es poder abastecerse de reservorios de agua como ríos, pozos y lagos, entre otros. Así como evitar el consumo de combustibles fósiles para transportarla, colaborando así económica y ambientalmente.

Figura 4. Uso del agua en Colombia

Extracción de agua:			
Extracción total de agua	2008	11 767	millones m ³ /año
- Agrícola (Riego)	2008	5 867	millones m ³ /año
- Agrícola (Ganadería)	2008	524	millones m ³ /año
- Municipal	2008	3 134	millones m ³ /año
- Industrial	2008	2 242	millones m ³ /año
• Por habitante	2008	261	m ³ /año
Extracción de agua superficial y agua subterránea (primaria y secundaria)	2008	11 767	millones m ³ /año
• % sobre los recursos hídricos renovables totales	2008	0.5	%
Fuentes de agua no convencionales:			
Agua residual municipal producida	2010	2 397	millones m ³ /año
Agua residual municipal tratada	2010	597	millones m ³ /año
Uso directo de agua residual municipal tratada	-	-	millones m ³ /año
Uso directo de agua de drenaje agrícola	-	-	millones m ³ /año
Agua desalinizada producida	-	-	millones m ³ /año

Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

Figura 5. Extracciones de agua por sector



Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

Alrededor de la mitad del uso del recurso hídrico se destina para la riego de cultivos, esto quiere decir que una base importante en la economía es la cosecha de frutos que son alrededor de 5867 millones de m³ al año. Los problemas que más se perciben a la hora de efectuar la siembra son:

- Reducción en caudales en época de sequia.
- Disponibilidad de agua subterránea con dificultad de extracción.
- El 64% del territorio nacional no es apto para la explotación de recursos hídricos (IDEAM, 2010).
- Los proyectos de riego y drenaje son anticuados, su creación fue a finales del siglo XIX por la *United Fruit Company* (IDEAM, 2010).

5.4 Definición del Problema

Para que realmente sea una definición de un problema debe contener los siguientes aspectos:

- Definir el sistema a diseñar en términos de su más difícil comprensión.
- Los resultados esperados (output) mediante indicadores medibles.
- Recursos disponibles (put), incluyendo el máximo costo requerido en términos de tales recursos.
- Establecer limitaciones como, tecnologías no disponibles, normas aplicables, consideraciones políticas, etc.

La dificultad radica en diseñar un vehículo sin motor tipo remolque, para transportar un sistema de bombeo solar fotovoltaico útil para riego de cultivos frutales. Con base a la norma técnica Colombiana (NTC-4788) se establecen los parámetros legales para la construcción de este. Estas especificaciones otorgan cierta seguridad en su construcción y movilidad.

Algunas de estas especificaciones son las siguientes, es un remolque tipo 2 que su peso máximo son 16 Ton, su eje es sencillo por lo que el peso máximo son 6 Ton. Su ancho máximo son 2.60 m su altura máxima 4.10 m y por último su máxima longitud son 12 m. Es de aclarar que estos datos son con el remolque vacío y sin la barra de tiro.

Por lo que los parámetros de definición del problema para un remolque tipo 2 son:

- Ancho hasta 2.60 m.
- Altura de remolque hasta 4.10 m.
- Longitud hasta 12 m.
- Peso vacío hasta 16 Ton.
- Peso de eje sencillo hasta 6 Ton.

Ya que este remolque será transportado por vías públicas del territorio, se escogerán las mejores alternativas presentadas, ya que esta norma está verificada por el Ministerio de Transporte.

5.5 Revisión de soluciones en el pasado

5.5.1 *Análisis de Factibilidad*

La mejor manera de solucionar un problema es generando la mayor cantidad de alternativas de soluciones posibles. Incluye las soluciones del pasado, como las soluciones propuestas por el equipo de diseño. Los métodos para estimular estas alternativas son:

- **Lluvia de ideas**

O también llamada tormenta de ideas, es una herramienta de trabajo y de pensamiento creativo que facilita el surgimiento de nuevas ideas sobre un tema o problema determinado.

- Ejemplo: elegir el nombre de un producto.
 - Trabajar de manera aislada.
 - Obtener una lista más larga y completa de ideas.
 - Aportar notas en lluvia de ideas al grupo.
 - Tener una idea excelente sin saber mucho de otros temas y ser inspirador.
- Los principios para el desarrollo de la tormenta de ideas son:
 - La crítica no está permitida.
 - La libertad de pensamiento es indispensable.
 - La cantidad es fundamental.
 - La combinación y la mejora deben ponerse en práctica.

- **Método 635**

Las ventajas del método 635, como lo plantea Warfield (1997):

- Fácil de usar.
- No requiere de un moderador en el desarrollo del método.
- El potencial innovador del grupo puede utilizarse plenamente.
- Todos los participantes permanecen activos e implicados en el desarrollo de la actividad.
- Se evitan las discusiones prematuras.
- Cualquier idea útil se desarrolla sistemáticamente después de que todos los participantes den sus ideas.
- El autor de la idea puede ser fácilmente identificado.

Con todo, hay que consignar que el método 635 también cuenta con una serie de desventajas que conviene tener en cuenta:

- Algunos participantes pueden tener problemas al describir sus ideas de forma exacta y precisa.
- Algunos participantes pueden sentirse presionados por el tiempo límite de 5 minutos.
- Puede generar soluciones menos creativas dado que la naturaleza principalmente individual de las contribuciones no se aprovecha de las discusiones grupales.

- **Método Delphi**

Antes de iniciar un Delphi se realizan una serie de actividades previas, entre las que se encuentran hacer una delimitación del contexto y el horizonte en el que se desea realizar la previsión sobre el tema en estudio, posteriormente se hace la selección de los expertos y se cuenta con la colaboración de los mismos en la investigación, para en definitiva explicar a los expertos en qué consiste el método, tal como lo expresa Astigarraga (2003).

- **Sinéctica**

Este método es desarrollado por William Gordon (1961) y colaboradores George Prince, el cual se empleó en el área empresarial e industrial, su funcionamiento principal es el empleo de analogías y comparaciones metafóricas, con el propósito de resolver diversos problemas y desarrollar nuevos productos, para lograrlo existen 5 técnicas en la analogía:

- Analogía directa.
- Analogía personal.
- Analogía contraria.
- Analogía simbólica.
- Analogía fantástica.

- **Catálogo de soluciones**

- El objeto del catálogo es brindar información para el manejo de equipos, empresas o situaciones que necesiten soluciones en ofertas o servicios.

- Los catálogos son bases de datos en progreso y se actualiza a medida que se dispone de nuevos datos.
- **Combinación de métodos:**
 - La comparación es, por tanto, un aspecto genérico del pensamiento humano, no solamente un método. Los científicos la utilizan en sus investigaciones para reconocer de manera sistemática, clara y ordenada las similitudes y diferencias buscando un mayor control de los datos y su mejor análisis.
 - Siguiendo a Bericat (en Bermúdez, 2005), pienso que no hay teorías, métodos ni técnicas perfectas, de ahí que muchas veces una adecuada combinación de elementos sea obligada para responder a las preguntas que el investigador se plantea.
- **Principio de inversión:**

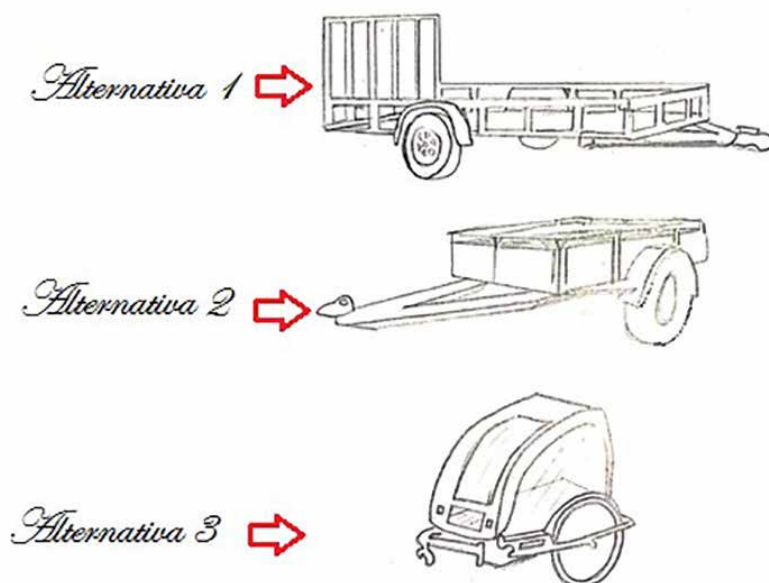
El principio de inversión básicamente consiste en un proceso de acumulación de capital, con la expectativa de obtener beneficios futuros, la condición para realizar una inversión es la existencia de una necesidad insatisfecha, y la condición es que el rendimiento supere el costo. En este sentido, el capital adquirido es posible diferenciar entre inversiones productivas e inversiones financieras.

Entre las inversiones productivas pueden identificar las siguientes (Castillo Chiriboga, 2015):

- a. Inversiones de mantenimiento. Necesarias para sustituir o reparar los equipos que se encuentren desgastados o en mal estado.
- b. Inversiones de reemplazamiento. Consiste en sustituir equipos que están obsoletos por otros nuevos.

- c. Inversiones de crecimiento. Conducentes al aumento de la producción de la empresa o a la ampliación de los canales de distribución de sus productos, con el fin de que la empresa crezca.
- d. Inversiones estratégicas. Las cuales buscan reafirmar la empresa en el mercado, protegiéndola de riesgos potencialmente altos que pudieran poner en peligro la permanencia en el mercado.
- e. Inversiones impuestas. Son las que no se realizan por motivos económicos, sino por motivos legales, acuerdos sindicales, entre las que se encuentran, las destinadas a la protección del ecosistema que rodea a la empresa o las inversiones, o las realizadas en la seguridad e higiene en el trabajo de los empleados.

Figura 6. Bocetos ganadores realizados por el método 635.



Fuente: Autores.

5.5.2 Análisis de Funcionalidad

5.5.2.1 Análisis Comparativo

Como se mencionó, para este proyecto de investigación se seleccionó los posibles diseños del remolque mediante la generación de ideas del método 635. La siguiente matriz de decisión muestra la evaluación de cada una de las alternativas propuestas, así como sus respectivos porcentajes de ponderación para cada parámetro; la matriz fue evaluada por cada uno de los integrantes.

Parámetros a evaluar en la matriz de decisión:

P1. Costo de construcción.

P2. Tiempo de construcción.

P3. Espacio ocupado.

P4. Mantenimiento.

P5. Potencia requerida.

P6. Usabilidad y seguridad.

P7. Complejidad de la construcción y montaje.

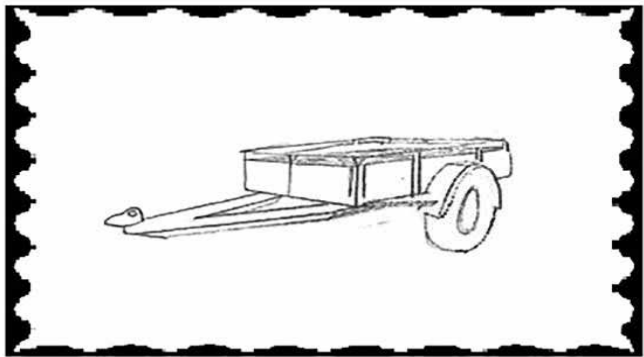
P8. Ergonomía y estética.

PARÁMETROS DE DISEÑO									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	TOTAL
	0,25	0,05	0,15	0,15	0,05	0,20	0,10	0,05	1
ALTERNATIVA 1	6	6	4	6	4	7	7	6	5,9
ALTERNATIVA 2	7	8	5	8	5	8	8	7	7,1
ALTERNATIVA 3	5	5	7	3	7	4	2	9	4,8

El puntaje otorgado de 1-10 se ve reflejado en que mayor sea el número, mejor será el desempeño en ese punto o categoría, por consiguiente, entre menor sea el valor, su comportamiento en el punto será deficiente.

La alternativa ganadora fue el número dos. Gracias a la matriz de decisión, se pudo escoger, por lo que los cálculos y demás factores se verán reflejados en el siguiente boceto.

Figura 7. Alternativa ganadora de la matriz de decisión.



Fuente: Autores.

5.5.3 Diseño Preliminar

En el proceso de diseño mecánico, (López L.A., 2016) se tuvo en cuenta metodologías novedosas como el diseño conceptual, generación de ideas y análisis funcional del vehículo transportable de riego, junto con el soporte del análisis por elementos finitos de la parte estructural. Una vez se identificó y analizó la necesidad de diseñar el vehículo transportable, se planteó el problema de ingeniería, teniendo en cuenta resultados esperados y recursos disponibles, también, bajo el cumplimiento de la norma técnica colombiana NTC 4788, apartado uno, donde especifica los requisitos que se deben cumplir para el funcionamiento y transporte por carretera de vehículos remolcados, con dimensiones, máximos pesos brutos vehiculares y máximos pesos por eje, según su clasificación. Una parte del análisis de factibilidad, fue la generación de ideas para el vehículo, por lo que se utilizó el método 365, que se basó en reunir un grupo de 6 expertos que generan 3 ideas en cinco minutos.

En esta etapa se desarrolló un diseño preliminar basado en la alternativa seleccionada. (SHIGLEY, 2008) en el cual se incluyeron los siguientes análisis:

- Análisis funcional para asegurar que el sistema en proceso de diseño pueda efectuar las funciones requeridas adecuadamente.
- Análisis de seguridad para evitar daños en su funcionamiento.
- Dibujos generales y de detalle.
- Selección de materiales.
- Estimación de costos.

Para los requerimientos en las dimensiones, se tuvo en cuenta principalmente el peso de la instalación de la bomba y componentes del sistema solar fotovoltaico.

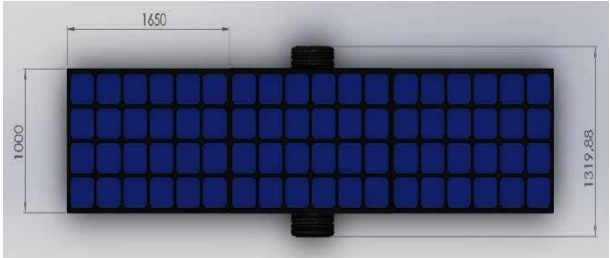
Tabla 2. Peso total del sistema fotovoltaico y electrobomba.

Componente	Dimensiones l x w x h (mm)	Peso (kg)	Peso Total (Kg)
ElectroBomba	450x240x270	10	21
Tres Paneles	1650x992x 40	19	57
Regulador	130 x 186 x 70	1.25	1.25
Baterías	314x181x360	51,4	102,8
Inversor	293x150x98	3,1	3,1
Peso del sistema fotovoltaico y bomba			185,15

Fuente: Autores

El espacio entre tallos de los árboles, ya sea en surcos o calles es de 4 metros, pero entre ramas es aproximadamente de 1.5 metros, esto nos limita a diseñar un vehículo menor a esta dimensión, por tanto, los paneles se unen de forma longitudinal, y así el ancho quedaría de 1m, como se puede apreciar en la Figura 8.

Figura 8. Instalación de los paneles en paralelo



Fuente: Autores

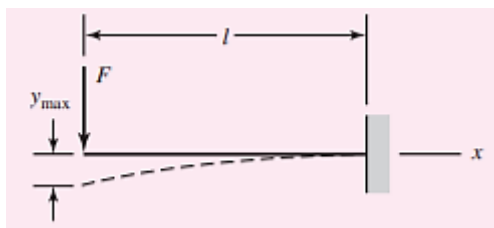
Conociendo la máxima longitud de los paneles en forma desplegada que es de 4950 mm, aproximadamente 5 m, se diseñó una estructura metálica, que soporte el peso de los paneles (57 kg) y un chasis metálico que soporte el peso de la bomba y los componentes fotovoltaicos (185,15kg). Además, se seleccionan unas llantas de 13 pulgadas con labrado adecuado para el terreno agrícola.

5.5.3.1 *Análisis teórico del muelle*

En el análisis de factibilidad se decidió por parte del grupo de diseño, que todo el peso del vehículo debe estar soportado en un sistema de hojas de resorte o muelle mecánico, generando más seguridad a los elementos fotovoltaicos, en especial, a los paneles solares, ya que este sistema amortigua el peso, disminuyendo vibraciones y cuidando la integridad de los elementos.

Se analizó el muelle como una viga en voladizo con la carga máxima en el extremo, ver Figura 9.

Figura 9. Viga en voladizo.



Fuente: Libro shigley

Utilizando el teorema de Castigliano, que se basa en la estimación de la energía potencial en sistemas elásticos. A partir de este planteamiento, se derivó la energía respecto a la carga aplicada, encontrando así la deflexión de la viga o del muelle.

$$U = \int_0^l \frac{M^2}{2EI} dx$$

$$U = \int_0^l \frac{F^2 x^2}{2EI} dx$$

$$U = \frac{F^2 x^3}{6EI}$$

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial F}$$

$$\delta = \frac{Fl^3}{3EI}$$

La analogía utilizada fue, analizar el muelle como un elemento de resistencia homogénea y el efecto de su inercia es en forma de triángulo, ya que la distribución de las hojas tiene esta forma, lo cual nos permitió estimar la longitud del muelle y el ancho para determinar el número de hojas.

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

$$\delta = \frac{6Fl^3}{Ebh^3}$$

De esta forma se encontró la función de la deflexión para el muelle, en función de la carga aplicada, la longitud, la base y el espesor de cada hoja.

Se realizó el análisis de fatiga a vida infinita, por lo que se expresó el sistema en los esfuerzos alternantes y medios, se utilizó un factor de concentración de esfuerzos de K_f de 1.7, apoyados de la literatura como en el libro de diseño de máquinas de Juvinal.

$$\sigma_a = k_f \frac{M_a c}{I} = k_f \frac{9F_a l}{bh^2}$$

$$\sigma_m = k_f \frac{M_m c}{I} = k_f \frac{9F_m l}{bh^2}$$

La resistencia a la fatiga se estimó como la mitad de la resistencia última del material y ajustando el límite de la resistencia a la fatiga por medio de factores de corrección.

El factor de corrección de carga (Shigley) se tomó como 1, ya que el muelle está sometido a flexión y para el factor de tamaño, el muelle no es redondo, de modo que se debe calcular un diámetro equivalente con base al 95% de área sometida a esfuerzo.

Con el fin de obtener un diseño conservador, se utilizó un factor de confiabilidad, para el 99,9% deseado.

Se utilizó un acero AISI 1095 comúnmente utilizado en estos muelles, y se estimó una resistencia a la fatiga de 550 MPa aproximadamente, ya que en la literatura se encontró una resistencia última a la tracción de 1200 MPa.

A partir de este planteamiento, se pudo expresar una función que contenga solo la longitud y la base.

Se planteó un análisis a partir de la rigidez del elemento, se encontró otra expresión donde se dejó la longitud en función de la base, conociendo la rigidez del material como 30 N/mm.

$$P = k\delta$$

$$2F = k\delta$$

$$k = \frac{Eb h^3}{3l^3}$$

Se planteó para la solución suponer un esfuerzo alternante menor a la resistencia a la fatiga corregida del material, con un valor de 500 MPa, de esta forma se resolvió el sistema de ecuaciones, y se encontró valores aproximadamente de 600 mm para la longitud y 40 mm para el espesor, así se estimó el número de hojas que se erigió 6 según un espesor comercial de 7 mm.

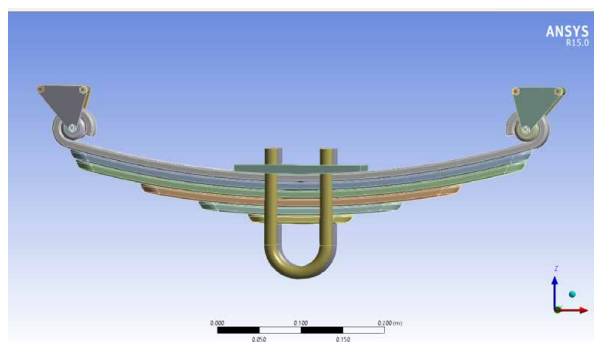
5.5.3.2 Simulación del muelle

Con el fin de realizar un análisis teórico y numérico por elementos finitos, se realizó la simulación del muelle, con las dimensiones estimadas en el análisis teórico, y se sometió a condiciones de frontera, como se va a emplear en el vehículo remolcado.

Se utilizó el software de simulación numérico Ansys Workbench® 15.0, con el fin de encontrar los esfuerzos máximos y comparar con el análisis teórico, para que el muelle pueda funcionar en óptimas condiciones.

Se exportó desde el Software Solidworks en un formato. IGES la cual lo lee sin inconvenientes Ansys. Se procedió a crear el modelo.

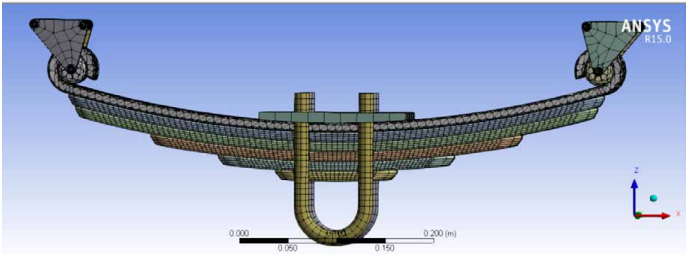
Figura 10. Geometría del muelle exportada a Ansys.



Fuente: Autores

Se realizó el dibujo CAD en SOLIDWORKS®, el cual permitió exportar la geometría de la superficie de la probeta dibujada. Para un buen análisis en ANSYS®, en la malla empleada se utilizó un elemento plano con espesor constante y se malló con una malla regular mapeada y se resolvió usando diferentes modelos de aproximación para el material. (Louche, 1996).

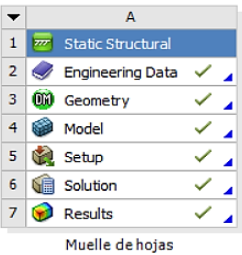
Figura 11. Mallado del muelle.



Fuente: Autores

En el software se ajustaron los parámetros del material para un acero AISI 1095, en engineering data, (Ramírez, La energía solar fotovoltaica en Colombia: potenciales, antecedentes y perspectivas, 2016) una vez se llenó esta información, se exportó la geometría y se malló el muelle en geometry y modelo, para restringir la simulación con los parámetros de frontera, aplicando desplazamientos y fuerzas en set-up, y finalmente se dio solución donde se analizarán los resultados.

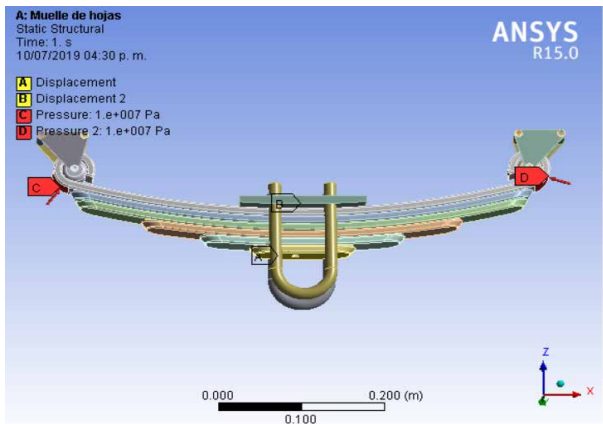
Figura 12. Estructura de simulación en Ansys



Fuente: Autores

Las condiciones de frontera se aplicaron restringiendo el desplazamiento donde está sujeto el muelle en el eje y aplicando la carga en los extremos, como presión para que sea más homogénea la región de aplicación de la misma, ver Figura 11.

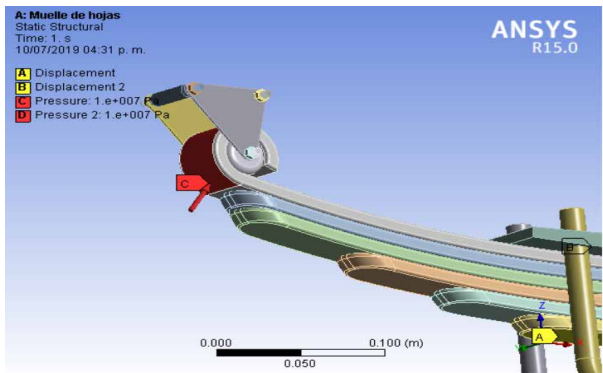
Figura 13. Condiciones de frontera.



Fuente: Autores

Se decide aplicar la carga en forma de presión, en el extremo, los elementos de sujeción no hacen parte del análisis, ya que se dejaron para orientar en qué posición va el muelle.

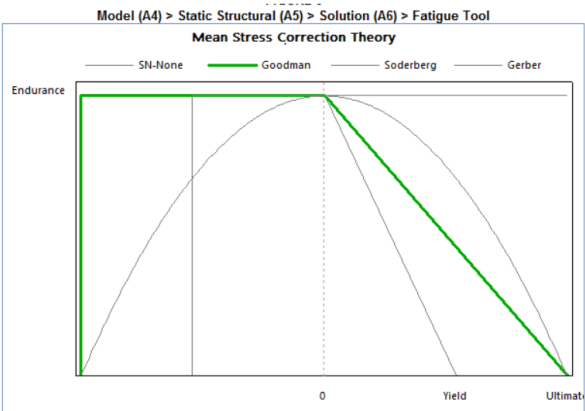
Figura 14. Aplicación de la carga en el muelle.



Fuente: Autores.

Se utilizó el criterio de falla por fatiga de Goodman, que es uno de los criterios más conservadores y utilizados en esta aplicación de sistemas mecánicos.

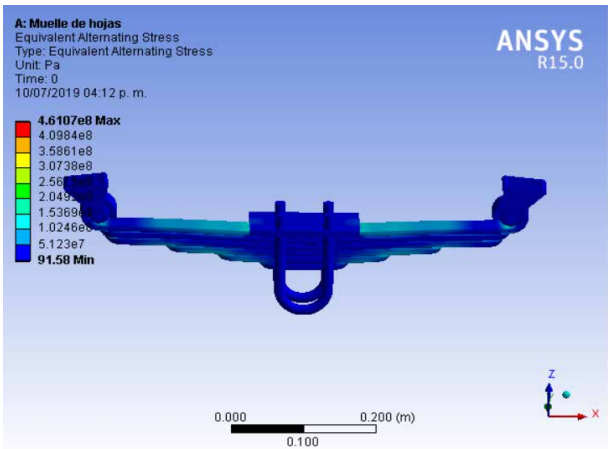
Figura 15. Criterio de falla por fatiga de Goodman (Ansys).



Fuente: Autores

Se eligió para el análisis de resultados, el esfuerzo equivalente alternante de Von Mises y el desplazamiento máximo, el cual fue comparado con el análisis teórico, ver Figura 16.

Figura 16. Esfuerzo equivalente alternante de Von Mises.

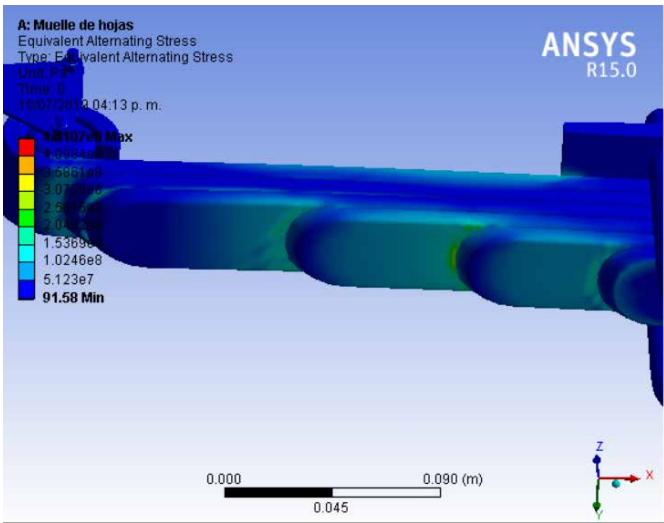


Fuente: Autores

El resultado del esfuerzo máximo es de 200 MPa en el cuerpo de las hojas, lo cual es bueno, ya que se planteó en el desarrollo teórico, la suposición de 500 Mpa, lo que era esperado, ya que se diseñó con las dimensiones obtenidas en el análisis teórico.

También es importante resaltar que el esfuerzo máximo producto de cargas cíclicas, no debe superar la resistencia a la fatiga del material, para poder garantizar su óptimo funcionamiento.

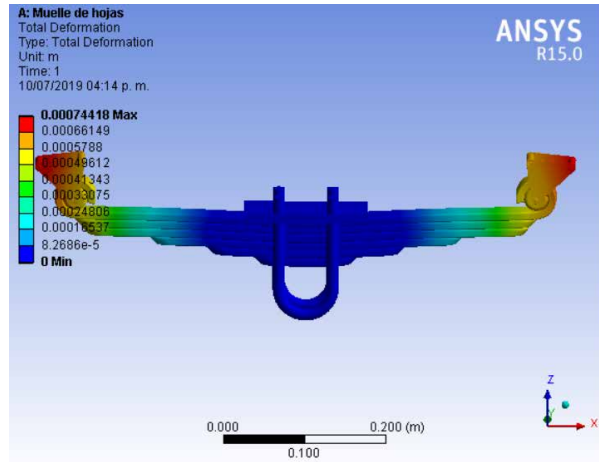
Figura 17. Concentración de esfuerzos del muelle.



Fuente: Autores.

Las concentraciones de esfuerzos se esperaban en las uniones y cambios de sección donde el área es muy pequeña, sin embargo, el valor es de 460 MPa y no supera la resistencia a la fatiga, lo que indica que el muelle cumplirá una buena función en el vehículo.

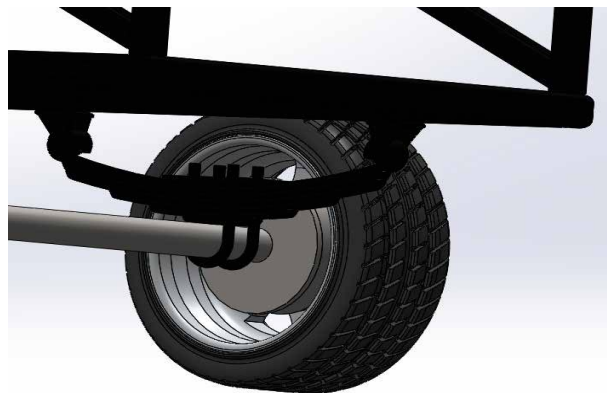
Figura 18. Desplazamiento máximo.



Fuente: Autores

Es importante observar las deformaciones máximas del elemento mecánico, por lo que se analizó en los resultados, encontrando un desplazamiento máximo 0.6 mm en los extremos, la cual es permisible e indica que la carga total del vehículo estará segura amortiguada por el muelle.

Figura 19. Montaje del muelle.



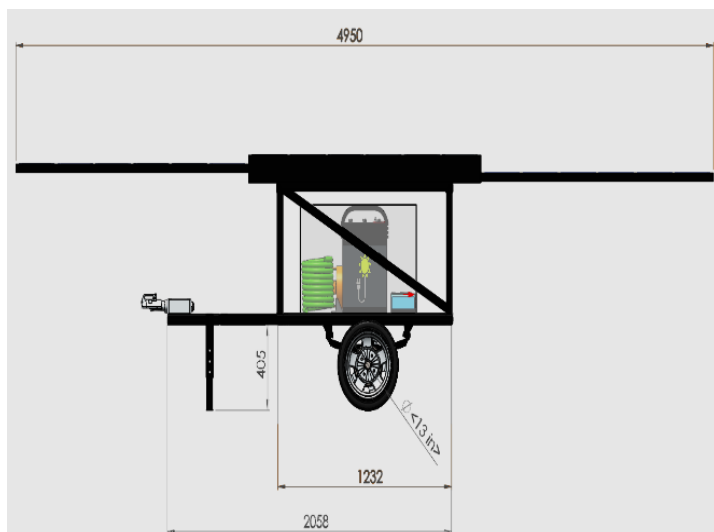
Fuente: Autores

Una vez se determinó que el diseño del muelle cumplía con todos los parámetros de diseño planteados, se propuso el montaje, ver Figura 20, y se diseñó todo el vehículo.

5.5.3.3 Descripción estructural del vehículo

Bajo los parámetros de restricción de la norma NTC 4788, y la lluvia de ideas del comité de diseño, se diseñó un vehículo portátil para riego que será remolcado.

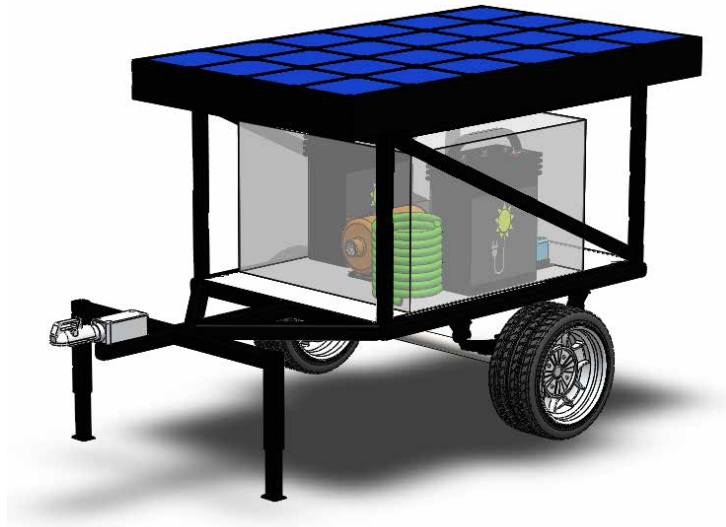
Figura 20. Diseño de la estructura del vehículo y sus dimensiones.



Fuente: Autores

Para el transporte del vehículo, se diseñó un sistema corredizo para recoger los paneles y hacer más fácil la estabilidad y movilidad. Además, se plantea un sistema de gancho o tiro de remolque para ser transportado con una motocicleta adaptándose a los cambios de dirección del conjunto moto – remolque.

Figura 21. Diseño de Vehículo con paneles recogidos vista frontal.



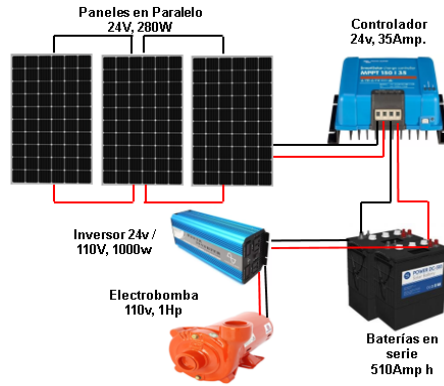
Fuente. Autores

Las baterías se instalan en el centro del planchón dejando un espacio entre ellas para ubicar la electrobomba. El cableado de las baterías de 12v que, instaladas en serie, generan 24v se cubren con canaletas de protección de cables. Los cables que van de los paneles al controlador están conectados en paralelo (24V) para aumentar el amperaje y potencia, bajan por la estructura metálica por una canaleta de seguridad.

La electrobomba se ubica junto al controlador e inversor, quedando libre para soltar y ubicar junto al reservorio o fuente para irrigación, y la manguera de salida queda libre para el riego a los árboles frutales.

El controlador se encarga de recibir el voltaje de los paneles y regularlos a 24v, para así alimentar las baterías que van a enviar una carga constante a la bomba.

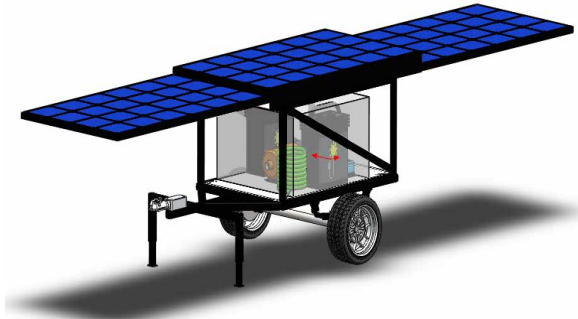
Figura 22. Instalación del sistema solar fv y bomba



Fuente: Autores.

Para poner en funcionamiento el sistema de bombeo fotovoltaico, primero se estabiliza el vehículo con los soportes delanteros, luego se despliegan los paneles para aprovechar al máximo la radiación solar, se instala la bomba en la fuente hídrica (Río, laguna, etc.) y la descarga al sistema de riego por goteo.

Figura 23. Diseño de Vehículo con paneles extendidos vista frontal.

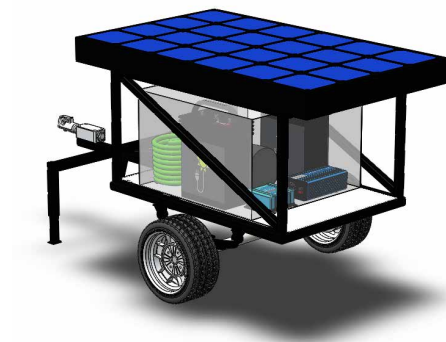


Fuente: Autores

Los componentes fotovoltaicos y la bomba estarán instalados y sujetos al piso o chasis del vehículo, protegidos por una caja

metálica, como se puede apreciar en el diseño, caja que a su vez se podrá asegurar con candado.

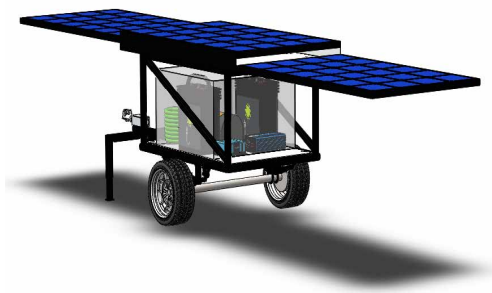
Figura 24. Diseño de Vehículo con caja metálica para protección de los componentes.



Fuente: Autores

La ubicación de los componentes más pesados (baterías y electrobomba) es sobre las ruedas, ubicando el regulador e inversor en la parte trasera y la manguera delante de las baterías esta distribución permite que el centro de gravedad del vehículo esté sobre la amortiguación y ruedas, para así darle firmeza. Además, se diseñan dos soportes delanteros que, en el momento de abrirse los paneles solares, estos puedan contrarrestar la fuerza del viento, evitando el volcamiento del vehículo.

Figura 25. Vehículo con paneles abiertos y soportes delanteros apoyados al suelo.



Fuente: Autores

Bibliografía

- Admindefinca. (30 de septiembre de 2019). *Finca y Campo*.
Obtenido de: <http://www.fincaycampo.com/2014/09/la-importancia-del-riego-en-los-cultivos/>
- Astigarraga, E. (2003). El método delphi. *San Sebastián*:
Universidad de Deusto.
- B, M. C., S, J. E., & CAMACHO-TAMAYO, J. H. (2012).
Crecimiento del fruto de peral bajo el sistema de riego por
goteo con una y dos líneas. *Revista Colombiana de Ciencias
Hortícolas*.
- Bautista, M. C., Sánchez, J. E., & Camacho-Tamayo, J. H.
(2011). Evaluación de dos sistemas de riego por goteo en la
producción y la calidad de la fruta de pera (*Pyrus communis*
L.) variedad Triunfo de Viena. *Acta Agronómica*.
- Castillo Chiriboga, Y. A. (2015). *Evaluación económica y financiera
en el Departamento de Inversiones de la oficina matriz de la
Cooperativa de Ahorro y Crédito Riobamba Ltda., en el período
2012–2013* (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica
de Chimborazo).
- Copesa, G. (30 de septiembre de 2019). *ICARITO*. Obtenido de:
<http://www.icarito.cl/2009/12/370-7187-9-el-agua-componente-esencial-de-los-seres-vivos.shtml/>
- Gurovich, L. A. (1985). *Fundamentos y diseño de sistemas de riego*.
San José, Costa Rica: INSTITUTO INTERAMERICANO
DE COOPERACIÓN PARA LA AGRICULTURA.
- López L.A. (2016) Diseño conceptual y óptimo de sistemas
mecánicos, U. de Guanajuato, México.

- Lloveras, J. (2007). Creatividad en el diseño conceptual de ingeniería de producto. *Creatividad y Sociedad*.
- Louche, G. N. (1996). Autonomous hybrid photovoltaic power plant using a back-up generator: a case study in a Mediterranean Island. En G. N. Louche, *Renewable Energy volume 7* (págs. 371-391). Ajaccio, France: Pergamon.
- Marc Muselli, G. N. (1999). DESIGN OF HYBRID-PHOTOVOLTAIC POWER GENERATOR, WITH OPTIMIZATION OF ENERGY MANAGEMENT. En *SOLAR ENERGY* (págs. 371-391). ElSevier.
- Ramírez, J. G. (2016). La energía solar fotovoltaica en Colombia: potenciales, antecedentes y perspectivas. *CRAI Usta Tunja*.
- SHIGLEY, J. E. (2008). *DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA*. MCGRAW-HILL, Workbench Theory Reference.

