

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA
ALIMENTADO POR ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA ZONAS NO
INTERCONECTADAS EN LA GUAJIRA**

DANIEL FELIPE ENGATIVÁ TAMAYO

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ-COLOMBIA
2019**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA
ALIMENTADO POR ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA ZONAS NO
INTERCONECTADAS EN LA GUAJIRA**

DANIEL FELIPE ENGATIVÁ TAMAYO

**Proyecto de grado en la modalidad de solución a un problema de ingeniería
para optar al título de ingeniero mecánico**

**Director
Héctor Fabio Montaña Morales
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ-COLOMBIA
2019**

DEDICATORIA

A Dios que me dio la salud, la sabiduría, la paciencia y la voluntad para llevar a cabo mis estudios y mi formación como profesional.

A mis padres que me enseñaron que la perseverancia, el esfuerzo y las ganas de seguir adelante pueden más que cualquier obstáculo que tenga que enfrentar en mi camino, además por su apoyo incondicional, su compañía, sus consejos, su cariño y fomentar para mi vida principios de honestidad y responsabilidad.

A mis familiares, amigos y docentes los cuales estuvieron aconsejándome, motivándome y brindando apoyo en cada uno de los pasos que han formado mi camino como profesional y como persona.

*“HAY UNA FUERZA MOTRIZ MÁS PODEROSA QUE EL VAPOR, LA
ELECTRICIDAD Y LA ENERGÍA ATÓMICA; LA VOLUNTAD”*

ALBERT EINSTEIN

*“SI LA HUMANIDAD TUVIERA LA VOLUNTAD DE HACER LA PAZ, SERIAMOS
RICOS EN AMOR. SI LA HUMANIDAD TUVIERA LA VOLUNTAD DE CUIDAR LA
TIERRA SERIAMOS RICOS EN VIDA, PERO LA HUMANIDAD ES RICA EN
PODER, RICA EN DINERO PERO POBRE EN VOLUNTAD, POBRE EN VIDA”*

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

A mi director Héctor Fabio Montaña Morales por su dedicación, colaboración, tiempo y seguimiento durante el proceso de elaboración de este proyecto y la formación recibida durante este proceso.

Al ingeniero Jesús Ramírez Pastrán y Andrés Gerardo Clavijo Vargas por su apoyo en la investigación y asesoramiento en el área de energía fotovoltaica y diseño del sistema.

A la Universidad Santo Tomás de Aquino, a sus seccionales Bogotá y Tunja. De igual manera a todos los docentes que hicieron parte de mi proceso de formación académica, profesional y personal, contribuyendo en la obtención de valores y conceptos académicos que serán distinguidos para el ejercer de mi vida profesional.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
JUSTIFICACIÓN	17
OBJETIVOS	18
1. MARCO REFERENCIAL	19
1.1 LEY 1715 DE 2014 (6)	19
1.2 CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS DE LA GUAJIRA	20
1.2.1 Red eléctrica Nacional.	21
1.2.2 Radiación solar.	21
1.2.3 Red hídrica.	22
1.2.4 Cultura Wayúu.	23
1.3 URIBIA	24
1.3.1 Puntos de agua subterráneos en Uribia.	25
1.3.2 Parámetros fisicoquímicos del agua.	27
1.4 ESTADO DEL ARTE	28
1.4.1 Sistemas de extracción de agua y uso de energía FV en la Guajira.	28
1.4.2 Bombeo solar.	29
1.4.3 Extracción FV de agua en Latinoamérica.	30
1.5 BOMBA HIDRÁULICA	31

1.5.1 Bomba centrífuga.	31
1.5.2 Bomba vertical de turbina.	32
1.5.3 Bomba sumergible	32
1.5.4 Bomba tipo lapicero (motor sumergible).	32
1.6 ENERGÍA FOTOVOLTAICA	32
1.6.1 Módulo fotovoltaico.	33
1.6.2 Panel fotovoltaico.	34
1.6.2.1 Funcionamiento de la celda solar.	34
1.6.2.2 Tipos de paneles fotovoltaicos.	36
1.6.3 Batería.	37
1.6.4 Regulador.	37
1.6.5 Inversor.	38
1.6.5.1 Tipos de inversores.	39
2. SELECCIÓN DEL TERRITORIO	40
2.1 RADIACIÓN SOLAR DEL TERRITORIO SELECCIONADO	42
3. DISEÑO DEL SISTEMA	44
3.1 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	44
3.2 ANÁLISIS MORFOLÓGICO	45
3.3 MATRIZ PUGH	46
3.3.1 Aplicación de la matriz pugh.	48
4. CÁLCULOS DEL SISTEMA	51
4.1 CÁLCULOS HIDRÁULICOS	52
4.1.1 Punto de operación de las bombas.	56

4.1.2 Eficiencia de la bomba.	57
4.2 CÁLCULOS DEL SISTEMA FV	58
5. ANÁLISIS DE COSTOS	62
6. CONCLUSIONES	65
7. RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFÍA	67
ANEXOS	73

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Número de captaciones por unidad geológica en el municipio de Uribia.	26
Tabla 2. Estadística de los parámetros fisicoquímicos tomados en los puntos de agua subterránea inventariados en el municipio de Uribia.	28
Tabla 3. Comparación entre las tecnologías de silicio aplicadas a los paneles fotovoltaicos	38
Tabla 4. Radiación mensual en la ubicación de aplicación	43
Tabla 5. Morfología	45
Tabla 6. Opciones de diseño	46
Tabla 7. Matriz Pugh	49
Tabla 8. Características del resultado de cálculo de la bomba y referencia de bomba seleccionada	55
Tabla 9. Características de operación de la las bombas seleccionadas	58
Tabla 10. Horas de trabajo de las bombas en el punto de operación para extraer un volumen de 10 m ³	58
Tabla 11. Datos obtenidos en ecuaciones y calculadora solar	61
Tabla 12. Costos del diseño de las diferentes profundidades	63

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Zonas No Inteconectadas en Uribia. IPSE.....	21
Figura 2. Radiación en la Guajira.....	22
Figura 3. El pueblo wayúu en las tierras áridas de la Guajira	23
Figura 4. Mapa del Departamento de La Guajira	24
Figura 5. Resguardos y comunidades Indígenas – IGAC- DANE	25
Figura 6. Concentración de Rancherías y capacidad de pozos en la Guajira.....	27
Figura 7. A pedlazos, comunidades wayús reactivaron pozos de agua.....	29
Figura 8. Instalación solar fotovoltaica: principio de funcionamiento y componentes principales.....	33
Figura 9. Paneles solar fotovoltaicos	34
Figura 10. Explicación del funcionamiento de una celda solar fotovoltaica, donde los fotones suministran la energía necesaria para liberar electrones que forman una corriente eléctrica continua	35
Figura 11. Recopilación figuras 5 y 6.....	41
Figura 12. Puntos de pozos y comunidades wayúu	41
Figura 13. Localizaciones en google earth	42
Figura 14. Radiación sobre la horizontal en el sitio de aplicación.....	43
Figura 15. Estructura básica de la matriz de decisión.....	48
Figura 16. Sistema de extracción de agua subterránea.....	51
Figura 17. Punto de operación diseño 1	56
Figura 18. Punto de operación de los diseños 2,3 y 4	57
Figura 19. Datos de la instalación.....	60
Figura 20. Producciones y consumos para la profundidad 1 en el año.....	61

ABREVIATURAS

Q = caudal

ν = viscosidad cinemática

γ = peso específico del agua

v = velocidad

A = área

D = diámetro

H_A = potencia suministrada por la bomba al fluido

h_L = pérdidas en el sistema

N_R = número de Reynolds

f = factor de fricción

E = rugosidad

H_L = pérdidas en el sistema

k = coeficiente de fricción de accesorios

P = potencia

e_B = eficiencia de la bomba

L_{MDC} = energía media diaria necesaria en el mes crítico

E_{DMF} = energía media diaria suministrada por el panel en el mes crítico

N_T = número de paneles FV necesarios

INTRODUCCIÓN

Las comunidades indígenas de La Guajira en Colombia soportan duras condiciones climáticas, sed y desnutrición. Además han sido vulneradas por los gobiernos de turno permitiendo que entidades mineras operen sin medir ni mitigar, riesgos medioambientales ocasionados por su operación, entre los cuales se encuentra el desabastecimiento de agua potable dejando a las comunidades carentes de dicho recurso. Por otra parte la región conocida como la Alta Guajira del departamento no se encuentra conectada a la red nacional de energía eléctrica perteneciendo así a las denominadas zonas no interconectadas (ZNI).

El agua es escasa en la superficie, sin embargo, se conoce que es abundante en el subsuelo gracias a estudios realizados por diferentes entidades. Se han encontrado puntos hídricos a diferentes profundidades en el departamento, denominados pozos subterráneos o acuíferos. Estos son de difícil acceso para las comunidades, por lo que son muy pocas las áreas en las que las personas pueden beneficiarse del recurso hídrico, normalmente son en los pozos de poca profundidad.

Considerando que el departamento de la Guajira cuenta con recursos potencialmente beneficiosos a la comunidad, como la gran irradiación solar y los pozos de agua subterráneos que pueden ser la solución a sus necesidades de hidratación. En este proyecto se planteó un diseño de un sistema solar fotovoltaico (FV) para accionar una bomba hidráulica capaz de extraer agua de diferentes profundidades en los pozos donde usualmente las comunidades no pueden acceder a ella. Además de estar diseñado para trabajar en zonas no interconectadas (ZNI) el diseño no aporta gases de efecto invernadero gracias al uso de energía solar como fuente primaria.

En el presente documento se encuentra el diseño completo del sistema de extracción de aguas subterráneas. Comienza por una recopilación de las condiciones geográficas del territorio de la Guajira, que permite entender las restricciones del acceso al agua y las principales especificaciones iniciales del diseño. Posteriormente se seleccionó el territorio en el cual se desarrollará el proyecto basándose en la radiación recibida en la zona, el acceso a pozos subterráneos y la ubicación de comunidades carentes de agua.

Una vez determinada la región y el tipo de pozo se presentan los cálculos ingenieriles tanto hidráulicos como eléctricos realizados para el diseño y elección de equipos necesarios en el proyecto. Finalmente se presenta un análisis de costos del proyecto y las respectivas conclusiones y recomendaciones.

Este proyecto cuenta con la información y conceptos básicos acerca de la energía FV, los estudios que comúnmente suelen hacerse para la aplicación de sistemas eléctricos de este tipo y los diferentes dispositivos que se emplean; las normativas y leyes que apoyan y subsidian este tipo de proyectos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia, el departamento de la Guajira, está ubicado en el extremo norte del país localizado entre los 10°23' y 12°28' de latitud norte y los 71°06' y 73°39' de longitud este. Cuenta con una superficie de 20.848 Km² que representa el 1,8 % del territorio nacional. La Guajira tiene un clima árido, seco y altas temperaturas; las lluvias son escasas y se presentan de septiembre a noviembre; la red hídrica es sencilla, su cauce más importante es el río Ranchería, que nace en la Sierra Nevada de Santa Marta y desemboca en el mar caribe (1).

Gracias al río Ranchería y sus acuíferos en los niveles profundos de rocas y depósitos, en La Guajira, las comunidades indígenas han podido subsistir al pasar de los años porque esta es una de sus principales fuentes de agua. Pero, como consecuencia de la llegada de multinacionales y empresas mineras como El Cerrejón, quienes llegaron a adueñarse del cauce del Río para beneficiarse ellos mismos, dejaron a las comunidades wayúu desprovistas de agua potable (2).

Para maximizar sus utilidades por medio de altos volúmenes de extracción de carbón, las mineras decidieron desviar el Río para mejorar la obtención del mineral negro. También se desviaron otros cuerpos de agua en la región que junto con la deforestación e intervención de proyectos mineros han afectado el ciclo hidrológico (2).

A pesar que la presencia de estas empresas ha incrementado el nivel de regalías del departamento, este incentivo económico no se ha visto reflejado en las comunidades de la región, por el contrario ha generado problemas ambientales, dejando a estas comunidades con un suministro de agua mínimo para sobrevivir y una gran cantidad de muertos por desnutrición y deshidratación. Adicionalmente las comunidades no cuentan con la ayuda o reconocimiento por estas empresas, debido a esto se ven obligadas a utilizar el poco recurso que les queda que son las aguas subterráneas (3). Estas se pueden extraer de pozos que existen en la región, sin embargo, algunos de estos depósitos de agua se encuentran a tan grandes profundidades que dificulta el extraerla para su consumo (4).

En los pozos profundos es posible utilizar bombas hidráulicas para extraer agua, sin embargo, en las zonas de la Guajira, donde más es escasa el agua, no hay un fácil acceso a la electricidad debido a que no pertenecen a la red interconectada nacional, por lo tanto deben utilizar combustible fósil para accionar estos equipos, lo que implica un costo de funcionamiento elevado por su difícil acceso a este tipo de fuentes de energía. Por otra parte se genera un impacto ambiental negativo generado por las emisiones de gases, por lo que el uso de estos equipos no es deseable en las áreas desérticas donde se encuentran las comunidades indígenas (5)

La Guajira es un departamento que cuenta con una alta incidencia de radiación solar que lo hace un buen candidato para el uso de sistemas fotovoltaicos como fuente de energía eléctrica para el desarrollo de la región y sus comunidades.

Por lo tanto, debido a la escasez de agua en la Guajira, su limitación al acceso de electricidad y las características climáticas que ofrece. Se planteó el diseño de un sistema que pudiera aprovechar la radiación solar que ofrece el departamento para extraer agua de pozos subterráneos beneficiando así a las comunidades cercanas a estos en la alta Guajira.

JUSTIFICACIÓN

Las comunidades que viven en la alta Guajira pertenecientes a las ZNI, tienen los recursos y características geográficas que permiten la implementación de tecnologías alimentadas con energías renovables, siendo la energía solar una de sus principales potenciales. La cual, puede ser utilizada para la implementación de sistemas de extracción de aguas subterráneas alimentados con energía fotovoltaica, que permita a la población wayúu el acceso al agua, mitigando así sus necesidades primarias de hidratación y aseo.

El sistema sería amigable con el medio ambiente pues tendría como fuente de energía el sol, tiene facilidad de mantenimiento lo que garantiza una alta vida útil y su instalación es viable en las zonas estudiadas. Por otra parte el proyecto cumple con los requisitos necesarios para que las comunidades e inversionistas que quieran hacer parte de esta propuesta puedan acceder a los beneficios otorgados por la ley 1715 de 2014 que incentiva la implementación de tecnologías que aprovechen fuentes no convencionales de energía.

El diseño tiene un perfil de aplicación para zonas no interconectadas, lo cual representa una aplicabilidad en zonas con características similares en otras partes del departamento de la Guajira y del país.

OBJETIVOS

GENERAL

Diseñar un sistema de extracción de agua subterránea alimentado por energía solar fotovoltaica para zonas no interconectadas en la Guajira.

ESPECÍFICOS

1. Recopilar la información técnica y conceptual necesaria para el diseño del sistema de extracción de agua subterránea.
2. Ubicar un acuífero subterráneo en una zona con radiación solar suficiente para implementar un sistema de extracción cercano a una comunidad con base en la información recopilada.
3. Realizar el diseño de detalle de un sistema de extracción de agua subterránea a partir de la selección del territorio, con base en cálculos ingenieriles del sistema hidráulico y el sistema de energía solar, incluyendo un análisis de costo de fabricación del diseño.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 LEY 1715 DE 2014 (6)

La ley 1715 de 2014 promueve la inversión en el uso de energías renovables que ayuden a la producción de energía limpia para el país generando nuevos ingresos que permitan a la comunidad cuidar de la fauna y flora que hay, dejando de depender de las hidroeléctricas y la generación de energía a partir de combustibles fósiles.

Aprovechando las características climáticas del país, se puede tener como materia prima en la generación de energía limpia la radiación solar y los fuertes vientos que yacen en algunas de las regiones del país. Esta ley fue aprobada para establecer el marco legal y los instrumentos para la promoción y aprovechamiento de fuentes no convencionales de energía principalmente las de carácter renovable. También para el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para la producción de energía.

Igualmente la ley tiene establecido el cumplimiento de compromisos asumidos por Colombia a través de la aprobación del estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (Irena) mediante la Ley 1665 de 2013 como compromiso al acompañamiento y ayuda del protocolo de Kioto, que luego sería reemplazado por el acuerdo de París para reducir los Gases de Efecto Invernadero (GEI) comprometiendo no solo a los países industrializados si no a más de 130 países, entre ellos Colombia (7).

La ley 1715 tiene una serie de artículos que menciona los beneficios y límites que aplican para este proyecto:

Según el artículo 9, con el fin de sustituir la generación con diésel en ZNI el gobierno implementará áreas de servicio exclusivo de energía eléctrica y gas combustible para reducir así, las emisiones de gases contaminantes y los costos de prestación de servicios mediante la sustitución de generación por diésel por generación de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) y tendrán que cumplir con lo establecido de la ley 142 de 1994 que establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.

También se desarrolla un esquema de incentivos para los prestadores de servicio de energía eléctrica en ZNI que cambien parcialmente o totalmente la generación con Diésel a FNCE.

El artículo 10, dice que se creará el fondo de energías no convencionales y gestión eficiente de la energía para financiar programas de aplicación de FNCE y gestión eficiente de la misma. Los recursos que ingresen a este fondo podrán financiar

parcial o totalmente proyectos o programas dirigidos a estratos 1, 2 y 3, sin embargo, estos recursos aplicará a proyectos que cumplan con estudios costo – beneficio en los que pueden aplicar entidades públicas, privadas o la nación, asimismo podrán contribuir en organismos de carácter multilateral e internacional.

Esta ley también beneficiará a los inversionistas como:

- Artículo 11: El ministerio de ambiente y desarrollo sostenible certificará el beneficio ambiental a los obligados a declarar renta por el fomento de la investigación e inversión en el ámbito de la producción y utilización de energía a partir de FNCE. Como beneficio tendrán derecho a reducir anualmente de su renta, por los 5 años consecutivos al año gravable que hayan hecho la inversión, el 50% del valor total de la inversión realizada.
- Artículo 12: Los equipos, elementos, maquinaria y servicios nacionales o importados que se apliquen como pre inversión o inversión, para la generación y utilización de energía a partir de FNCE serán excluidos de IVA.
- Artículo 13: Las personas naturales o jurídicas que sean titulares de nuevas inversiones en proyectos FNCE tendrán el beneficio de abstención al pago de los derechos arancelarios de importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos destinados exclusivamente para los proyectos de dichas fuentes.
- Artículo 14: A las maquinarias, equipos y obras civiles que sean necesarias para la inversión y operación en la generación de energía eléctrica a partir de FNCE se les podrá aplicar depreciación acelerada con una tasa anual no mayor de veinte por ciento (20%).

Por otro lado el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la energía (FENOGE) destinará recursos para el monitoreo de las soluciones instaladas en ZNI, también para la transferencia de tecnología y capacitación que avalen el funcionamiento continuo de los sistemas de suministro de energía desarrollados, dicho en el artículo 39 de la presente ley.

1.2 CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS DE LA GUAJIRA

La Guajira tiene un clima árido, seco y altas temperaturas. Las lluvias son escasas y se presentan únicamente de septiembre a noviembre, la red hídrica es sencilla, su cauce más importante es el río Ranchería, que nace en la Sierra Nevada de Santa Marta y desemboca en el mar caribe (1).

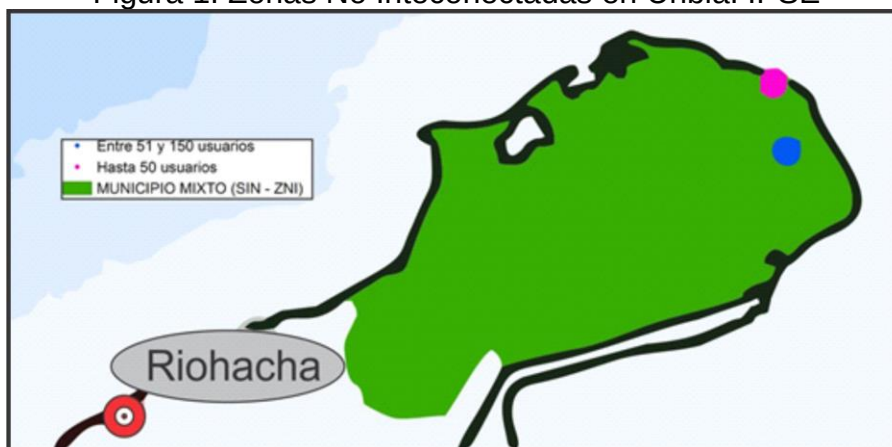
La población de La Guajira está conformada en su mayoría por comunidades indígenas. Algunas de estas están situadas en ZNI y no cuentan con acceso a servicios públicos como agua y luz lo que implica problemas de desnutrición y deshidratación que en algunos casos repercuten en la muerte (2).

1.2.1 Red eléctrica Nacional. La red eléctrica en Colombia es llamada red interconectada nacional, donde ciudades, pueblos y municipios se abastecen de energía por medio de ella. La red interconectada nacional hacia el 2013 cubría aproximadamente el 52% del territorio y las regiones restantes son las ZNI, estas incluyen algunos municipios del país donde el servicio es intermitente. Esta situación llevó a realizar estudios, por el instituto de planificación y promoción de soluciones para la ampliación de la red interconectada, en los cuales se encontró que en algunos municipios no podría llegar el servicio debido a la relación del costo por usuario que representa para el Gobierno llevar las interconexiones eléctricas hasta las regiones apartadas (9).

Aproximadamente el 70% del municipio de Uribia se encuentra en ZNI (10). La figura 1 muestra la situación de servicio eléctrico, con unos pocos usuarios de la electricidad en el municipio lo cual implica el difícil desarrollo de la población.

Debido a los problemas eléctricos en ZNI, el gobierno desarrolló la Ley 1715 de 2014 la cual beneficiará a las poblaciones que no tienen los servicios públicos básicos, como los que se encuentran en el departamento de la Guajira (6).

Figura 1. Zonas No Inteconectadas en Uribia. IPSE



Fuente: Sacado y modificado de IPSE– Informe Rendición Social de Cuentas (11).

1.2.2 Radiación solar. En la Guajira, la radiación solar es la más alta del País. Ya que, por su clima semiárido y la escasez de nubes, el departamento cuenta con una capacidad de radiación solar que la hace motivo de evaluación para la aplicación de

proyectos de energías alternativas como lo sería para la generación de energía eléctrica por paneles FV.

En la Guajira, según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en el atlas (figura 2) de radiación menciona el promedio anual de radiación solar sobre el departamento que está entre 5 - 5.5 Kwh/m²/Día (Kilo watt - hora por metro cuadrado al día) y el número de horas de radiación solar al día que es en promedio de 8,4 hSd (horas de sol diarias) (12).

1.2.3 Red hídrica. Se estima que el planeta Tierra está cubierto por un 71% agua y un 29% de masa continental, de este 71% de agua el 96,5% es agua salada que se distribuye en los océanos y el 3,5 restante es agua dulce que se encuentra a nivel superficial en ríos y arroyos y a nivel subterráneo en forma de acuíferos naturales, de esta manera el 95% del agua dulce corresponde a aguas superficiales, el 3,5 a aguas subterráneas y el 1,5 a la humedad acumulada en los suelos (14).

Figura 2. Radiación en la Guajira



Fuente: Sacado y modificado del IDEAM (13).

La Guajira tiene una gran disponibilidad de aguas subterráneas gracias a que la red hídrica principal de la Guajira está conformada por el Rio Ranchería que viene desde la sierra nevada de Santa Marta a desembocar en el mar caribe. En el departamento las pocas lluvias que caen, las sequias y el daño ambiental que se ha provocado, han hecho que el agua sea un recurso escaso, debido a esto, el agua se ha vuelto un negocio, en el cual el agua podría llegar a valer tres veces más que en una ciudad promedio. Por lo cual, a las comunidades se les dificulta pagar el agua ya que no cuentan con los recursos económicos para obtenerla (15).

Los pozos subterráneos han sido el medio de abastecimiento de agua para las comunidades indígenas por años, empleando métodos artesanales para extraerla. Pero en algunos casos los pozos se encuentran a una profundidad tal que dificulta el acceso al agua (14).

1.2.4 Cultura Wayúu. El pueblo wayúu (figura 3) es una comunidad indígena existente que representa la principal cultura indígena del país. Según el censo del DANE del año 2005 hasta ese entonces la población estaba conformada por el 48,88% de hombres (132.180 personas) y el 51,12% de mujeres (138.233 personas). Esta comunidad ha luchado contra las adversidades naturales de la región de la Guajira como los fuertes vientos, la escases de agua, la exposición solar y por otro lado la violencia, el racismo y la incomprensión por partes de las demás poblaciones que viven en esta zona (16).

Figura 3. El pueblo wayúu en las tierras áridas de la Guajira



Fuente: Periódico el espectador (8).

La economía de los wayúu radica principalmente en la venta de productos artesanales, pues se desempeñan en este oficio desde hace muchos años. Los wayúu viven en rancherías de las cuales existen algunas turísticas y culturales. Las rancherías turísticas son aquellas donde se puede ir a conocer un poco de la cultura wayúu y poder obtener alguno de sus productos artesanales (16). No obstante, en las rancherías culturales, las personas que allí viven son muy radicales frente a la tradición de su cultura por lo que son renuentes a los cambios tecnológicos que puedan beneficiarlos (17).

En una entrevista con una nativa de la Guajira, ella mencionaba que en algunas ocasiones llegaban entidades a realizar proyectos para beneficiar a las comunidades, pero la ranchería o la comunidad que se buscaba beneficiar, no dejó realizar proyectos porque estaba en contra de su etnia y su tradición (17).

La comunidad indígena Wayúu se encuentra ubicada en su mayoría en el municipio de Uribia, que es el municipio ubicado más al norte del departamento y de hecho del país, como se puede ver en la figura 4.

Figura 4. Mapa del Departamento de La Guajira



Fuente: La Guajira: De lo tradicional a lo digital (18).

1.3 URIBIA

Uribia es un municipio de la Guajira situado hacia el extremo norte, limitando por el sureste con la República Bolivariana de Venezuela, por el suroeste limita con los municipios de Maicao y Manaure; presenta una extensión de 8.200 Km² y una altura media de 10 m.s.n.m.

En Uribia (figura 2) la mayoría de su población hace parte de la comunidad wayúu y es conocido como el propietario colectivo del Gran resguardo de la Alta y Media Guajira. Ocupa una estratégica posición marítima y fronteriza; abarca toda la región de la Alta Guajira y una parte de la Media Guajira (19).

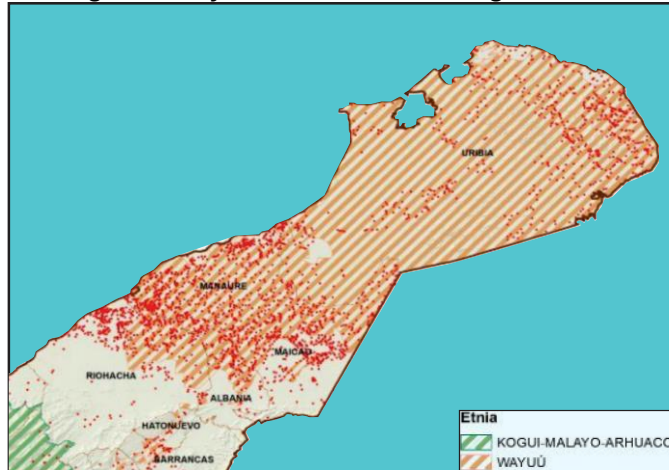
Uribia posee la mayor comunidad Wayúu de todo el departamento como se puede apreciar en la figura 5. Con un total de 644 comunidades Wayúu en el municipio (20).

Además el DANE hace una proyección del crecimiento de población wayúu hacia el 2019 de 147.646 habitantes para esta región del departamento (21).

Debido a que la información de la cantidad de población en cada ranchería es indeterminada y poco precisa, se decidió con base en los datos obtenidos en entidades como el DANE, ONIC, ministerio de vivienda, la gobernación de la Guajira

y la alcaldía de Uribia realizar un promedio de la población estimada, teniendo en cuenta que son 644 comunidades y 147.646 habitantes (Anexo G), obteniendo una población media de 230 personas aproximadamente por comunidad.

Figura 5. Resguardos y comunidades Indígenas – IGAC- DANE



Fuente: sacado y modificado de avances alianza por el agua y la vida de La Guajira (20).

1.3.1 Puntos de agua subterráneos en Uribia. Según el estudio realizado por el Sistema Geológico Colombiano (SGC) se han inventariado desde el año 2011, un total de 373 puntos de agua asequibles correspondiente a 24 manantiales, 245 aljibes y 104 pozos subterráneos.

Las captaciones de agua subterránea se encuentran distribuidas a lo largo de toda su jurisdicción, con mayor concentración hacia la parte sur donde se encuentra su cabecera municipal, extrayendo agua de las primeras capas acuíferas de los depósitos inconsolidados cuaternarios y de algunas formaciones terciarias, principalmente (22).

En los puntos encontrados por el SGC de los 104 pozos se determinaron los tipos de formaciones según corresponde en la Tabla 1.

Los tipos de formaciones indican la composición de la tierra donde se encuentra situados, estas composiciones se encuentran en el Anexo A. Las composiciones de las formaciones tienen implicación al momento de realizar la perforación de pozo, dependiendo del tipo de suelo, facilita o dificulta el trabajo de perforación.

Tabla 1. Número de captaciones por unidad geológica en el municipio de Uribia

FORMACIÓN	*REFERENCIA	CANTIDAD
Formación Siamana	E3s	2
Formación Maina	K1m	1
Formación Ipanaruhu	K2i	1
Granofels de jajoncito	Mpj	1
Formación castilletes	N1c	1
Formación Monguí	Nim	2
Depósitos Delgados	Q1t	6
Arenas Eólicas	Q1ae	8
Depósito de cauce aluvial	Q2al	12
Depósito de llanura aluvial	Q211	69
TOTAL	104	

Fuente: SGC (22).

* Formaciones geológicas

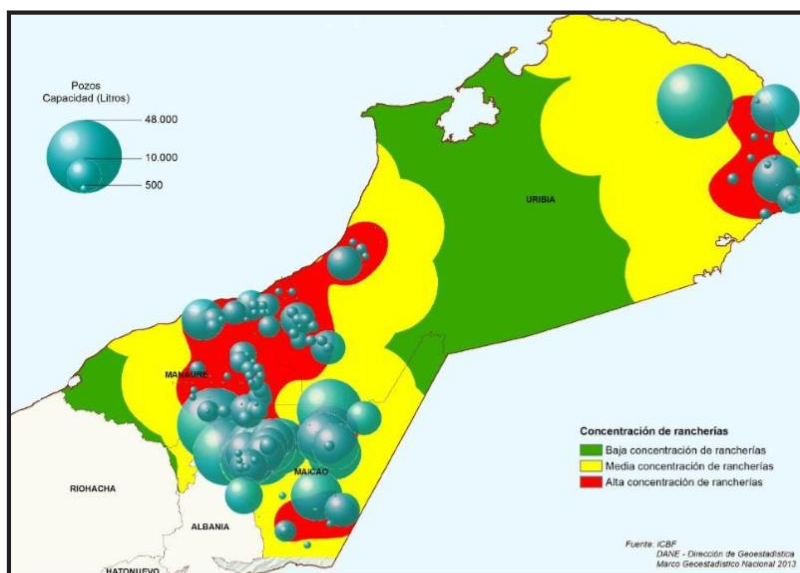
El estudio realizado por el SGC menciona que los pozos de agua tienen una profundidad entre 25 y 160 m hasta la capa freática (superficie del agua), y la profundidad de los pozos están entre 5 a 45 m (22).

Se denominan pozos profundos aquellos cuyas profundidades son mayores a 30 metros. Lo Cual implica que se deben atravesar diferentes formaciones geológicas con el propósito de interceptar un acuífero con fines de suministro para el consumo humano y este ducto debe ser revestido adecuadamente con tubería para garantizar su estabilidad (23).

En un estudio realizado en el 2015 por el DANE, se encontró que en Uribia se encuentran pozos donde se benefician las comunidades. Se ilustra en la figura 6.

En Uribia las precipitaciones, escorrentías y filtración de flujo de arroyos cerca de la Sierra de Macuira son los generadores de las cuencas subterráneas (22).

Figura 6. Concentración de Rancherías y capacidad de pozos en la Guajira



Fuente: sacado y modificado de avances alianza por el agua y la vida de La Guajira (20).

1.3.2 Parámetros fisicoquímicos del agua. El SGC hizo un estudio de campo sobre los parámetros fisicoquímicos del agua en todos los manantiales, aljibes y pozos del departamento de La Guajira. Como se muestra en la Tabla 2. La neutralidad en el pH del agua tuvo valores promedio entre 7,26 y 7,48 siendo así pH neutros.

La salinidad presente en los manantiales, aljibes y pozos superan el valor de 4,4, 3,7, 3,0 psu (Unidades prácticas de salinidad, equivalente a g/L de solución) respectivamente. Es importante tener en cuenta el parámetro de salinidad ya que existen captaciones para las cuales se presentan valores elevados, en cuyos casos es necesario realizar un tratamiento previo a su uso (22).

Los estudios no garantizan que el agua sea completamente saludable dado que no se sabe si el fluido contenga rastros de microorganismos o bacterias como el Cólera que puedan afectar a las comunidades que consuman de esta.

En 2010 la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció claramente el derecho humano al abastecimiento del agua y el saneamiento por lo cual la Organización Mundial de la Salud establece una normatividad y *Guías para la calidad del agua potable* que aborda la gestión de riesgos. Además de incluir la promoción de planes de salubridad del agua para identificar y prevenir peligros antes de que el agua se contage de sustancias, microorganismos y enfermedades (24).

Tabla 2. Estadística de los parámetros fisicoquímicos tomados en los puntos de agua subterránea inventariados en el municipio de Uribia.

Parámetro Fisicoquímico		Manantial	Aljibes	Pozo
PH	Valor más alto	9,47	8,5	8,42
	Valor más bajo	6,29	4,19	5,56
	Promedio	7,48	7,26	7,26
Conductividad	Valor más alto	59830	76000	35440
	Valor más bajo	576,7	415,3	934,8
	Promedio	7379,5	6496,4	5566,6
T (°C)	Valor más alto	35,5	35,3	35,2
	Valor más bajo	25,4	25	25
	Promedio	29,2	30,7	32,3
Solidos Totales Disueltos(ppm)	Valor más alto	29320	20330	17370
	Valor más bajo	283,1	2,5	458,6
	Promedio	3618,1	3040,5	2599,1
Salinidad (psu)	Valor más alto	40,36	59,8	22,51
	Valor más bajo	0,33	0,248	0,511
	Promedio	4,483	3,786	3,009
Resistividad (ohm-m)	Valor más alto	17,34	24,079	10,697
	Valor más bajo	0,167	0,132	0,282
	Promedio	5,718	3,471	3,295

Fuente: SGC (22).

1.4 ESTADO DEL ARTE

1.4.1 Sistemas de extracción de agua y uso de energía FV en la Guajira. En la Guajira los métodos de extracción de agua son desde la extracción por medio de un pozo, un balde y una cuerda, Bici bombas, molinos de viento y el uso de bombas accionadas por combustible fósil debido a no tener red energética.

En la Guajira se han implementado “bici bombas” en las cuales, las comunidades wayúu hacen turnos comunitarios para extraer el agua por medio de pedaleo que accionan una bomba, para así extraer el agua como se observa en la figura 7 (25).

Figura 7. A pedalazos, comunidades wayús reactivaron pozos de agua.



Fuente: Periódico El Tiempo (25).

El uso de energía FV en la Guajira es escaso, suele utilizarse para suplir la necesidad de energía eléctrica en el hogar pero no se ha encontrado información de la implementación de energía FV en dispositivos mecánicos de extracción de agua.

1.4.2 Bombeo solar. En el mercado de instalaciones FV o solares, se encuentra a la venta el bombeo solar. Son bombas ya adaptadas a los paneles FV, se encuentran para cualquier tipo de profundidad y llevan años de implementarse en regiones áridas y con la necesidad de consumo de agua tales como el continente Africano (26).

El bombeo solar son sistemas FV diseñados para la aplicación en ZNI debido a los menores costos de operación, mantenimiento y un reducido impacto ambiental frente a un sistema de bombeo mediante motores de combustión interna.

Debido a que la generación de energía FV es corriente continua y los dispositivos de bombeo comúnmente vienen en corriente alterna. Se utiliza un inversor que convierte la corriente continua en corriente alterna, por lo cual el bombeo solar puede ser empleado para abastecer complejos sistemas de irrigación, abastecimiento y almacenamiento de agua con grandes consumos de potencia eléctrica.

Los sistemas de bombeo solar se dimensionan a partir de las condiciones de irradiación solar del lugar y la altura dinámica.

1.4.3 Extracción FV de agua en Latinoamérica. En Latinoamérica, Colombia no es el único país que tiene ZNI y por supuesto escasez de agua entre sus comunidades. Por ello, se han desarrollado proyectos que utilizan fuentes naturales que tengan bajo impacto ambiental en territorios con características similares a los de la Guajira o la innovación de proyectos que generen bajo impacto ambiental.

En San Luis - Argentina se creó un proyecto de provisión de agua mediante bomba neumática accionada con energía solar a una población rural dispersa. Para la elaboración del proyecto se realizaron 3 estudios:

1. El sistema de bombeo neumático, el cual se desarrolló íntegramente, desde la etapa de investigación, diseño, prueba, y ejecución completa del sistema. Se llevaron a cabo continuos desarrollos y modificaciones que han permitido ir mejorando notablemente la eficiencia y el alcance de este sistema de extracción de agua a profundidad.
2. El recurso solar disponible en la zona, se determinó a partir de la irradiación solar global y difusa en valores horarios sobre una superficie inclinada.
3. El sistema fotovoltaico necesario, se determinó en función de las necesidades de consumo previstas (punto 1) y de los recursos energéticos (punto 2), estimando sus costos y posteriormente se realizó la comparación con distintas variantes o alternativas indicando las ventajas y desventajas técnico-económicas para cada caso (5).

En Loja – Ecuador se realizó el diseño y construcción de un prototipo de bombeo de agua mediante energía solar en el cual para su realización tuvieron en cuenta unos parámetros:

- a) Tener un suministro de agua.
- b) Saber la distancia a la que va a bombear.
- c) Potencia del sistema de bombeo
- d) Tipo de financiamiento con que cuenta dicho proyecto

El prototipo se impuso para bombear del río León para una pequeña comunidad de Loja. Hicieron todos los cálculos de la potencia necesaria para bombear el agua desde el río hasta una casa común así como también calcularon la batería y el inversor para los módulos fotovoltaicos. Realizaron las pruebas obteniendo resultados positivos. Los parámetros a tener en cuenta fueron primordiales para la

realización del proyecto ya que son los requisitos que debe tener el lugar, características del diseño para tener en cuenta los estudios de los cuales se concluyó el proyecto (27).

En la Guajira por los bajos recursos de agua y luz eléctrica se han implementado proyectos gracias a la ley 1715 y ya que la geografía del departamento ofrece recursos como los fuertes vientos y la radiación solar, la Guajira presenta una gran viabilidad para implementar proyectos de energías renovables (6).

La generación de energía en La Guajira a partir de energías renovables se encuentra en crecimiento paulatinamente debido a que sus poblaciones se encuentran en ZNI y esta energía es la más utilizada en proyectos sociales elaborados por otros países en colaboración con ONGs. Además estos proyectos ayudan a reducir los GEI que en la actualidad se deben disminuir según los acuerdos a cumplir para el tratado de París (7).

1.5 BOMBA HIDRÁULICA

Una bomba hidráulica es un dispositivo que transforma la energía mecánica en hidráulica. Al operar una bomba, esta cumple dos funciones: primero, la acción mecánica que produce la bomba crea un vacío en la succión, lo cual permite que la presión atmosférica mueva el fluido desde la fuente hasta la entrada de la misma. Segundo, la misma acción entrega el líquido a la salida de la bomba y lo empuja hacia el circuito hidráulico (28). Las Bombas hidráulicas se clasifican en Bombas roto dinámicas y Bombas de desplazamiento positivo

Las bombas que pueden ser utilizadas en sistemas de extracción de agua subterránea son las bombas roto dinámicas bomba vertical tipo lapicero y bombas sumergibles.

1.5.1 Bomba centrífuga. La bomba centrífuga es una bomba roto dinámica, la cual recibe el líquido a través de la tubería de aspiración desde la que ingresa axialmente hacia el impulsor, formado por un conjunto de álabes que giran dentro de una carcasa circular. El rodete es la parte primordial de una bomba centrífuga, este es accionado por un motor que está unido a un eje, sus álabes obligan al fluido a un movimiento de rotación direccionándolos hacia el exterior por el trabajo de la fuerza centrífuga que va aumentando la velocidad y presión. Cuando el flujo sale del rotor es recogido por la voluta, la voluta rodea el rotor y recoge el flujo que sale y lo guía hacia la descarga de la bomba. También transforma parte de la energía cinética que lleva el fluido en energía de presión (29).

1.5.2 Bomba vertical de turbina. La bomba vertical se extiende sobre el sitio donde se desea bombear el agua. En el extremo inferior de la tubería están montados impulsores múltiples en serie. El impulsor inferior lleva el fluido a la boquilla de succión y lo mueve hacia arriba al impulsor siguiente. Cada etapa incrementa la capacidad de carga de la bomba. Los impulsores se mueven por medio de un eje conectado a un motor eléctrico que se encuentra sobre la bomba (29).

1.5.3 Bomba sumergible (30). Estas bombas están diseñadas para que se pueda sumergir todo el conjunto de bomba centrífuga, el motor, el impulsor y los aparatos de succión y descarga.

Estas bombas son útiles para retirar el agua que no se desea en sitios de construcción, minas, servicios en sótanos entre otros. La succión de la bomba está en el fondo, donde fluye el agua a través de un filtro y hacia el ojo del impulsor resistente a la abrasión.

La descarga fluye hacia arriba a través de un pasaje anular entre el núcleo y la carcasa del motor. Arriba de la unidad, el flujo se reúne y fluye hacia un tubo o manguera de descarga que se localiza en el centro. EL motor seco se encuentra sellado en el centro de la bomba.

1.5.4 Bomba tipo lapicero (motor sumergible). La bomba tipo lapicero, es una bomba especialmente para la aplicación en pozos profundos consideradas autocebantes por lo que no tiene problemas de cavitación, es de la misma familia que las bombas sumergibles con la excepción que está diseñada para profundidades mayores. Normalmente se fabrican en acero inoxidable puesto que su permanencia en el agua así lo requiere (31).

Estas bombas pueden ser instaladas por medio de manguera flexible de alta capacidad de presión que se ofrece en el mercado. Las mangueras flexibles son de polipropileno, soportan temperaturas de fluido hasta de 40°C, además ya que son de material plástico, no ceden a la corrosión (32).

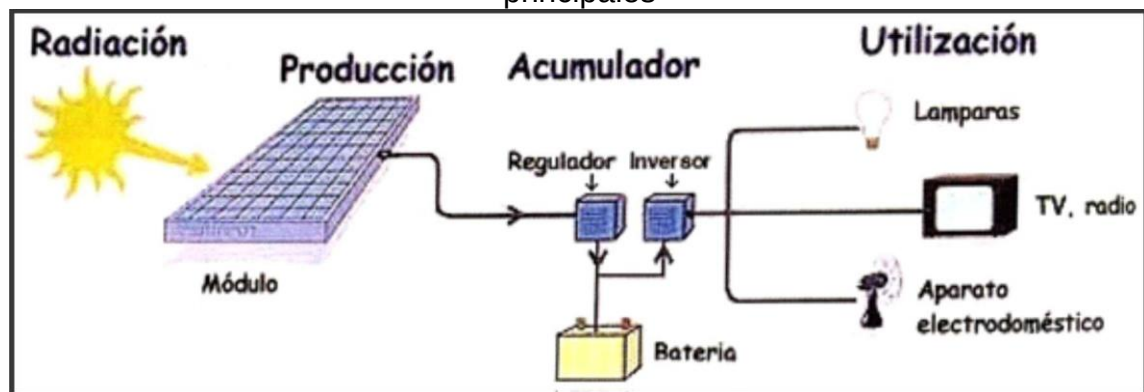
1.6 ENERGÍA FOTOVOLTAICA

La energía fotovoltaica (FV) es aquella que se produce por medio de instalaciones que funcionan con módulos fotovoltaicos, que capturan la luz solar, convirtiéndola en electricidad; los módulos solares se componen de celdas individuales que se fabrican con un material semiconductor llamado silicio (33).

La radiación que emite el sol, llega en forma de fotones a los paneles, lo que permite la aparición de una diferencia potencial o tensión, dado que el efecto fotovoltaico (separación de cargas eléctricas positivas y negativas) se conecta a una carga eléctrica que permite la circulación de corriente. Así todos los paneles del módulo solar fotovoltaico generan potencia eléctrica durante la presencia de luz solar (34).

1.6.1 Módulo fotovoltaico. El módulo FV es la composición de un sistema eléctrico FV. En la figura 8 se observa el diseño típico de una instalación fotovoltaica.

Figura 8. Instalación solar fotovoltaica: principio de funcionamiento y componentes principales



Fuente: Curso de energía solar (35).

La instalación fotovoltaica en la figura 8 está conformada por:

1. Panel solar (módulo), compuesto por células fotovoltaicas. Recibe radiaciones solares y las convierte en una corriente eléctrica continua.
2. Regulador de la corriente recibida
3. Batería para guardar la electricidad para los momentos sin sol.
4. Inversor. Transforma la corriente continua (cc) en corriente alterna (AC) que es la más utilizada actualmente.
5. Aparatos receptores (lámparas, televisión, radio y todo tipo de aparatos eléctricos).

Las instalaciones y montajes de un sistema FV deben ser ejecutados teniendo en cuenta las normas que indica el RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas) (36). La cual indica que el cableado, conexiones, estructuras, entre otros, deben estar de acuerdo a la norma NTC 2050 (37).

Figura 9. Paneles solar fotovoltaicos



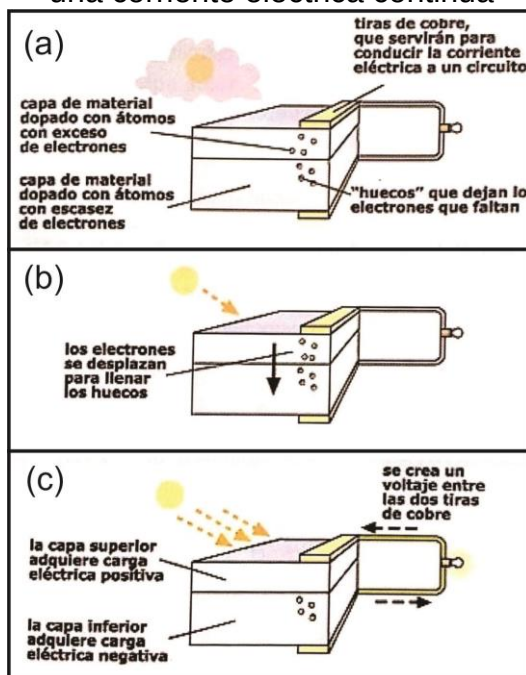
Fuente: Todo sobre los paneles solares (38).

1.6.2 Panel fotovoltaico. El panel solar fotovoltaico como el presentado en la figura 9 es el elemento fundamental de cualquier sistema solar fotovoltaico. Este tiene como función captar la energía solar incidente para generar una corriente eléctrica. Esto gracias a que la energía solar transporta fotones de luz, que luego son transformados en energía eléctrica al impulsar los electrones despididos desde un material semiconductor a través del circuito exterior. Estos paneles utilizan células FV que están fabricadas con materiales semiconductores que forman una unión N-P (redes cristalinas de silicio que son portadores de carga positiva y negativa). Dicha unión es capaz de producir una barrera interna potencial, que hace posible el efecto fotovoltaico (39).

1.6.2.1 Funcionamiento de la celda solar. Como se mencionó anteriormente, la celda solar funciona a partir de una unión N-P. Esta unión, como se ilustra en la figura 10 (a) está conformada por dos capas de material dopados, se les denomina así porque se les ha añadido elementos uniformemente en la red cristalina del material para afectar su conductividad.

La capa de material dopado superior, se le denomina tipo N debido a la presencia de electrones adicionales, lo cual se consigue incorporando como dopante átomos de fósforo en su estructura cristalina. Por otro lado la capa de material inferior es denominada tipo P por su escasez de electrones". Generalmente se emplea el *boro como dopante*. (26).

Figura 10. Explicación del funcionamiento de una celda solar fotovoltaica, donde los fotones suministran la energía necesaria para liberar electrones que forman una corriente eléctrica continua



Fuente: curso energía solar – UNESA (Asociación española de la industria eléctrica) (35).

El material tipo P, crea huecos que son rellenados por los electrones que sobran del material tipo N. Al interactuar los dos materiales se crea la unión denominada N-P ocasionando que la capa superior adquiera carga eléctrica positiva y la capa inferior adquiera carga eléctrica negativa.

Como se observa en la figura 10 (b, c) el movimiento de electrones, del material tipo N hacia el tipo P, se da gracias a la diferencia de potencial que se genera por la absorción de fotones provenientes de los rayos solares que inciden sobre el material tipo N. La interacción establece un circuito eléctrico entre ambas superficies, los electrones acumulados fluirán regresando a su posición inicial a través de las tiras de cobre. Este flujo de electrones forma lo que se conoce como una corriente fotogenerada o fotovoltaica (35).

Las celdas están conectadas eléctricamente entre sí, en serie o en paralelo, de forma que la tensión y corriente suministrada por el panel se incremente hasta ajustarse al valor requerido por una instalación específica pues se construyen según sea la necesidad o la demanda eléctrica que solicite el sistema, dado que para aumentar la tensión estos deben construirse en serie y si se desea aumentar la corriente estos deben ir en paralelo (39).

Por otra parte, es importante mencionar que para la compra de un panel FV se debe considerar:

- a) Normalmente los fabricantes muestran la ficha técnica de los paneles según condiciones estándar de medida. Estas son: temperatura de 25°C con una radiación solar de 1 kW/m².
- b) Algunos fabricantes proporcionan la potencia a la temperatura nominal de operación de la celda, que se obtiene teniendo en cuenta una temperatura de 20°C y una radiación de 800W/m².

Lo anterior es información útil para estudiar los datos en detalles de cada panel que se encuentra en el mercado y conocer el rendimiento real de los módulos solares bajo otras condiciones.

En el mercado también se encuentran productos no certificados o en dados casos, no mencionan los datos anteriores que a su vez pueden tener un rendimiento considerablemente menor una vez instalados (40).

Los paneles FV se deben instalar a una inclinación adecuada para obtener la mayor incidencia de radiación solar y para que las condiciones del ambiente (polvo, agua, tierra entre otras) no queden incrustadas en el panel.

Miguel Sánchez, en su libro Energía solar fotovoltaica (26), menciona que para el hemisferio Norte, los captadores solares sin importar su aplicación, deben orientarse siempre hacia el sur, ya que es la ubicación en la que la disposición anual de la radiación es máxima. La desviación no deberá ser superior a $\pm 10^\circ$.

1.6.2.2 Tipos de paneles fotovoltaicos. Los tipos de paneles fotovoltaicos varían según el material con el que fueron contruidos. Los paneles fotovoltaicos normalmente están conformados por silicio ya que en su estructura atómica hay 14 electrones de los cuales 4 están en la última capa que hacen posible el efecto fotovoltaico. A continuación se menciona los tipos de paneles que se utilizan en la energía FV.

- 1. Panel mono cristalino:** es un panel compuesto por silicio cristalino totalmente puro, tiene un rendimiento de 15% a 22% según sea el fabricante y es adecuado para superficies pequeñas. Algunos de los fabricantes garantizan su uso hasta por 25 años (26). Este panel es recomendado para instalar en climas fríos ya que tienden a absorber mejor la radiación y soportan menos el sobrecalentamiento (41). Normalmente su costo es elevado dada su compleja fabricación.
- 2. Panel policristalino:** es un panel compuesto por materiales dopados. Este tipo de panel tiene un rendimiento de 12% a 16% según sea el fabricante y tiene una tonalidad azul, este panel se fabrica a partir de planchas

policristalinas que son más económicas. Algunos fabricantes garantizan su uso de 20 a 25 años (26). Dado que su rendimiento es inferior pero es más barato, es el panel ideal para superficies grandes y es recomendado para instalar en climas cálidos ya que absorbe el calor a una mayor velocidad y le afecta menos el sobrecalentamiento (41).

3. **Panel amorfo:** es fabricado a partir de lámina delgada de acero y es un silicio no cristalino, con defectos en sus enlaces atómicos. Este panel tiene dos grandes desventajas: la primera es su baja conversión comparada a las células mono cristalinas y policristalinas; la segunda es que las células se ven afectadas por un proceso de degradación en los primeros meses de funcionamiento, reduciendo la eficacia a lo largo de la vida útil. La garantía puede ser de hasta 10 años con un rendimiento menor al 10% dependiendo del fabricante (26).

Además de estos tres tipos de paneles también existen paneles compuestos por arseniuro de galio con un rendimiento de 30% y es normalmente empleada en aplicaciones especiales como satélites, vehículos de exploración espacial, entre otros y células de telurio de cadmio/sulfuro de cadmio (CTS) con un rendimiento medio de 8% a 10%, pero dada que su producción a gran escala puede llegar a causar problemas medioambientales ya que este tipo de células es muy toxica (26), (42). En la Tabla 3 se muestra una comparación realizada entre los tres principales tipos de paneles.

1.6.3 Batería. Para un sistema de bombeo solar, las baterías dejan de jugar un papel importante, ya que si bien se puede bombear todo el volumen requerido en el día, no se requeriría de energía para la noche, además el costo de mantenimiento elevaría el valor del proyecto, puesto que habría que adicionar un regulador de tensión y las baterías después de cinco o siete años necesitan reemplazarse.

Por otro lado la introducción de baterías implica pérdidas de energía, mantenimiento regular, además podrían reducir la confiabilidad del sistema de bombeo FV e incrementar los requerimientos de mantenimiento, lo cual involucra más gastos (26).

1.6.4 Regulador. El regulador es un dispositivo electrónico que se encarga de conseguir que el módulo FV opere en el punto de máxima potencia, de igual manera, también controla los procesos de carga y descarga de la batería, evitando la sobrecarga y sobre descarga, consiguiendo la desconexión de los consumos. Dado que para el bombeo solar no se utilizan baterías, es innecesario el uso de regulador en el sistema que se diseñó en este proyecto (43).

Tabla 3. Comparación entre las tecnologías de silicio aplicadas a los paneles fotovoltaicos

TIPO DE CELDA	EFICIENCIA (%)		VENTAJAS	DESVENTAJAS
	Laboratorio	Producción		
Silicio Monocristalino	22.7%	15 a 22%	• Tecnología bien desarrollada y probada. • Estable. • Mayor eficiencia. • Se fabrica en celdas cuadradas.	• Emplea mucho material costoso. • Mucho desperdicio • Manufactura costosa
Silicio Policristalino	18%	12 a 16%	• Tecnología bien desarrollada y probada. • Estable • Buena eficiencia • Celdas cuadradas • Menos costoso que el monocristalino	• Material costoso. • Mucho desperdicio (menos que el monocristalino). • Manufactura costosa • Menor eficiencia que el monocristal
Silicio Amorfo	11.5%	4 a 10%	• Utiliza muy poco material. • Alto potencial y producción muy rápida • Costo bajo, 50% de silicio cristalino • Menos afectado por bajos niveles de insolación	• Degradación pronunciada. • Menor eficiencia. • Menor durabilidad.

Fuente: Energía solar fotovoltaica (42).

1.6.5 Inversor. Es un aparato electrónico que transforma la corriente continua en corriente alterna. El inversor transforma la tensión nominal de la instalación FV (señales de 12 V, 24V, 48V) en señales alternas de tensión, dependiendo si es inversor para sistema monofásico o trifásico (44). Estos sistemas son:

- a) Sistemas monofásicos: la tensión nominal de valor eficaz deber ser 230V entre fase y neutro, con una frecuencia de 50 Hz.
- b) Sistemas trifásicos: la tensión nominal de valor eficaz debe ser de 400V entre fases, con una frecuencia de 50 Hz.

Los inversores están diseñados para alimentar cargas de dispositivos comunes que se encuentran en el mercado. El inconveniente con los inversores es que no proporcionan las condiciones particulares (capacidad para entregar elevadas corrientes de arranque, baja tasa de distorsión armónica, entre otras) que si proporciona la red eléctrica, ocasionando que los dispositivos a alimentar tengan un mal funcionamiento (44).

En el mercado se encuentran inversores con diferentes tensiones nominales de entrada y de salida para un rango de potencia.

1.6.5.1 Tipos de inversores. Los inversores se clasifican en función de la forma de onda de la tensión alterna que proporciona la salida: onda cuadrada, onda cuadrada modificada y onda sinodal pura.

Aunque existen estos inversores, para el bombeo solar (bombeo de fluidos con alimentación fotovoltaica), se han diseñado inversores específicos para desempeñar el trabajo y además controlar el sistema. Estos inversores cuentan con una eficiencia del 98%, un módulo de control con circuito de detección de alto y bajo nivel de agua y características de seguridad que lo hacen totalmente confiable para la aplicación en lugares desolados (45).

2. SELECCIÓN DEL TERRITORIO

En este capítulo se presentan los argumentos tenidos en cuenta para la selección del territorio seleccionado para el desarrollo del diseño de un sistema de extracción de aguas subterráneas en la Guajira

Es importante mencionar inicialmente que uno de los propósitos de este trabajo es impactar de forma positiva a una población vulnerable de la Guajira, que no tenga un fácil acceso al agua. Este criterio se tuvo en cuenta en todo el proceso de selección del territorio que es presentado a continuación:

De los municipios del departamento de la Guajira, Uribia es el que está ubicado más al norte del país, perteneciendo a la llamada Alta Guajira. Gran parte de su territorio está ubicado en ZNI y es el municipio con mayor cantidad de rancherías o asentamientos donde habitan comunidades Wayúu. Por otra parte en este, la falta de acceso a servicios públicos de calidad es una realidad y uno de los motivos del bajo desarrollo de la región y de sus comunidades.

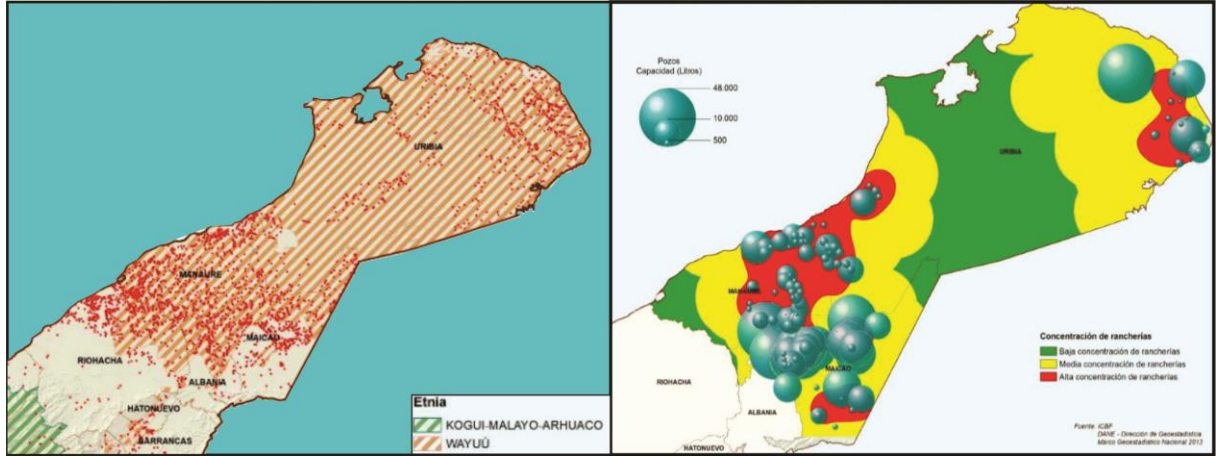
En especial la baja calidad de vida de la población que habita este municipio, influyo en la decisión que el proyecto debía ser diseñado para funcionar en Uribia. Sin embargo este cuenta con un área de 8.200 km², en los que aunque el nivel de radiación solar es similar, era necesario establecer un punto específico con acceso a uno o varios de los pozos subterráneos existentes en la región.

En la figura 11 se observa la unión de las figuras 5 y 6 del presente documento. En la parte izquierda de la figura se observa una gran cantidad de puntos rojos al sur del departamento, donde cada uno representa una población, es decir la mayoría de comunidades se concentran en esa zona, sin embargo, estas tienen una mayor posibilidad de ser conectadas al sistema interconectado nacional por lo que se descartaron dichas poblaciones para la implementación del proyecto. Por el contrario se ve que en la región nororiental del municipio de Uribia se encuentra una importante cantidad de poblaciones Wayúu y estas están muy alejadas de los límites del sistema interconectado.

En esta región de la Guajira se encuentran varias captaciones de aguas subterráneas como se ve a la derecha de la figura 11, es decir, la región nororiental del departamento tiene la presencia de varias poblaciones Wayúu y además fuentes subterráneas de agua, motivo por el cual se decidió seleccionar esta zona para implementar el proyecto.

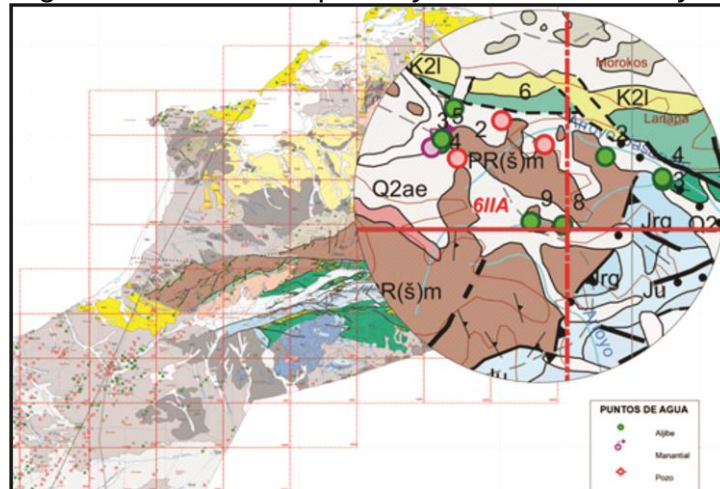
Para poder realizar los cálculos del sistema FV es fundamental determinar con exactitud la ubicación del territorio. Para dicho propósito se hizo uso de un estudio denominado “*Modelo hidrogeológico del departamento de la Guajira*” realizado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) publicado en 2016.

Figura 11. Recopilación figuras 5 y 6



Fuente: autor

Figura 12. Puntos de pozos y comunidades wayúu



Fuente: Sacado y modificado de estudio de SGC (22).

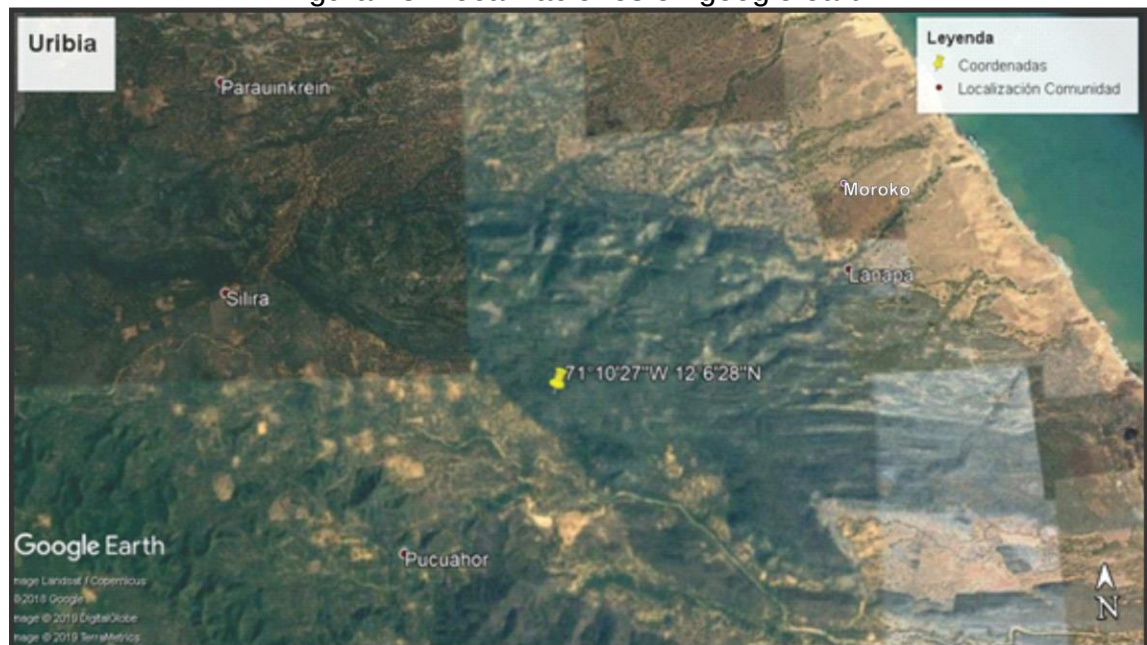
En la figura 12 se observa un mapa de la región, que muestra los pozos subterráneos presentes en la región nororiental de Uribia (Círculos rojos), que se hallan más cercanos a poblaciones indígenas, en este caso las rancherías de Lanapa y Morokos. Adicionalmente se extrajeron las coordenadas aproximadas del pozo, que son:

71°10'27"W y 12°6'28"N.

Se utilizó Google earth para observar el mapa colombiano en dichas coordenadas y en la figura 13 se muestran las poblaciones cercanas a ellas. Se observa que efectivamente Lanapa y Morokos se encuentran en las cercanías del pozo, pero

además se pueden ver 3 comunidades adicionales en un promedio de 3 Km que podrían ser beneficiadas de este proyecto.

Figura 13. Localizaciones en google earth



Fuente: Sacado y modificado de Google earth (46).

2.1 RADIACIÓN SOLAR DEL TERRITORIO SELECCIONADO

Como se mencionó en la sección 1.2.2, en el departamento de la Guajira la radiación solar tiene un promedio de $5,5 \text{ kW/m}^2$. Este valor es un promedio en la Guajira, pero, para poder calcular el sistema de paneles es esencial determinar con exactitud el valor de radiación además del tiempo de irradiación solar en el sitio exacto donde se desea implementar el sistema. Para hallar esta información se utilizó el mapa hidrogeológico de la región elaborado por el IDEAM y se verificó con el uso de "POWER Data Access Viewer" que es una aplicación desarrollada por la NASA que se encuentra en internet y es de uso libre.

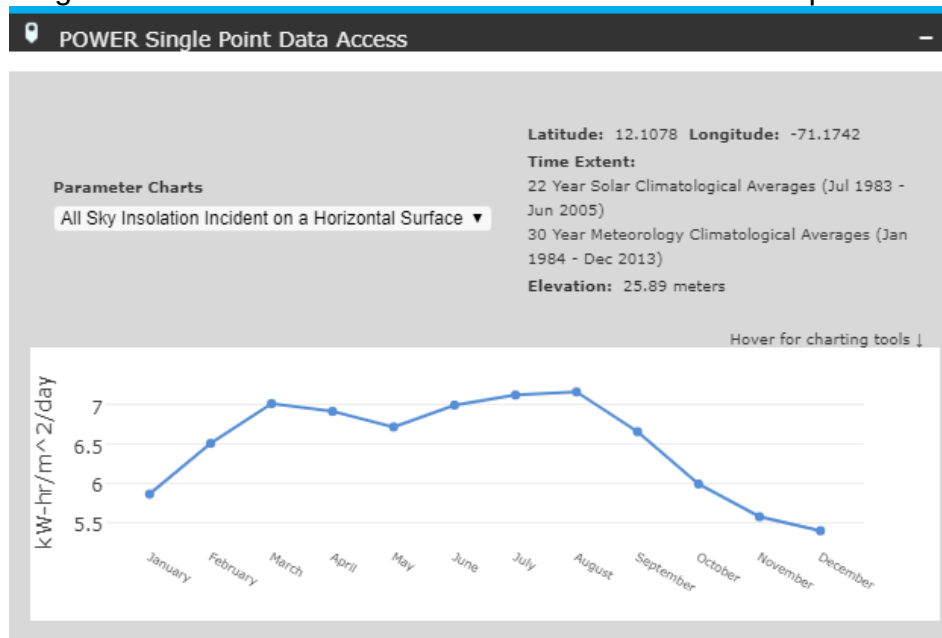
En la aplicación, es posible tener acceso a un conjunto de datos solares, meteorológicos (47). Entre la información que ofrece la aplicación se encontró la radiación sobre las coordenadas exactas del sitio seleccionado para implementar el proyecto.

En la figura 14 se muestran los datos obtenidos en la aplicación y se resumen en la Tabla 4. Al observar la figura es evidente que para el mes de diciembre se presenta

la menor radiación en el año con un promedio de 5,39 kW/m² y para el mes de agosto se logra la mayor radiación con un promedio de 7,17 kW/m².

El diseño del sistema FV debe hacerse con el valor de menor radiación en el año que es el de diciembre (5,39 kW/m²), sin embargo es uno de los más altos del territorio nacional y está por encima del mínimo requerido para el uso de energía solar fotovoltaica.

Figura 14. Radiación sobre la horizontal en el sitio de aplicación



Fuente: Prediction Of Worldwide Energy Resources (47).

Tabla 4. Radiación mensual en la ubicación de aplicación

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
5,86	6,51	7,02	6,92	6,72	7	7,13	7,17	6,66	5,99	5,57	5,39

Fuente: Prediction Of Worldwide Energy Resources (47) y autor .

Finalmente el pozo seleccionado para el cálculo del diseño y posible implementación del proyecto es el ubicado en las coordenadas 71°10'27"W y 12°6'28"N, por su cercana ubicación a poblaciones indígenas en el norte del municipio de Uribe que pertenecen a las ZNI.

3. DISEÑO DEL SISTEMA

El sistema de extracción que se diseñó para la Guajira debía tener en cuenta las características geográficas e Hidráulicas del pozo seleccionado, trabajar con la radiación solar presente en el área por medio del uso de paneles fotovoltaicos que accionen un mecanismo hidráulico para extraer y depositar agua en un tanque de reserva.

El diseño se escogió en base a las especificaciones de diseño, análisis morfológico y matriz de pugh. A partir de la metodología se seleccionó la opción más favorable para implementar en la región y es apto para cumplir la necesidad de las comunidades.

3.1 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

Las especificaciones serán los parámetros para seleccionar el diseño que solucione la “Función principal”, del sistema para cumplir con la necesidad requerida que es la escasez del recurso hídrico en la región y sea apto según la información recopilada acerca de la zona donde se podría desarrollar el proyecto. Las especificaciones son:

1. Los módulos FV deberán soportar temperaturas altas sin afectar su rendimiento.
2. El inversor deberá convertir la corriente para el correcto funcionamiento de la bomba.
3. El diseño será calculado para profundidades de 30, 70, 110 y 150 metros desde la superficie a la capa freática.
4. La bomba debe ser compatible para trabajar con energía FV.
5. La bomba deberá soportar la altura dinámica de las diferentes profundidades.
6. La bomba debe acondicionarse a las condiciones de salinidad del fluido.
7. El agua extraída debe ser depositada en un tanque a 3 metros de altura sobre la superficie de la tierra.
8. El tanque debe ser adecuado para las condiciones del territorio.
9. El sistema debe contener un controlador de nivel que active y desactive la bomba.
10. El sistema podrá extraer 10.000 litros de agua al día.
11. El sistema debe tener una vida útil aceptable.

3.2 ANÁLISIS MORFOLÓGICO

Para realizar el análisis morfológico o morfología, se escogió como función principal, extraer agua subterránea por medio de un mecanismo activado por paneles fotovoltaicos, las sub – funciones se extrajeron de las especificaciones de diseño que generaron una serie de conceptos como solución, como se puede ver en la tabla 5. A partir de la morfología se generalizan los conceptos para una posible opción de diseño que se evaluaron en la matriz pugh.

Tabla 5. Morfología

Producto: Diseño de un sistema de extracción de agua subterránea activado por paneles fotovoltaicos				
Función principal: Extraer agua subterránea por medio de un mecanismo activado por paneles fotovoltaicos.				
Sub - Función	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3	Concepto 4
Recibir radiación solar (tipo de panel fotovoltaico)	Monocristalino	Policristalino	Amorfo	
Conversión de corriente CC/CA	Inversor onda senoidal	Inversor onda cuadrada	Inversor onda cuadrada perfecta	Inversor bomba solar
Extraer el agua (Tipo de bomba)	Centrifuga vertical	Desplazamiento positivo	Sumergible	Bomba tipo lapicero
Transportar el fluido	Manguera	Tubería		
Almacenar el agua	Tanque a una altura de tres metros de la superficie	Un tanque el cual pueda ser transportado fácilmente por los usuarios	Un tanque que pueda ser transportado en un vehículo	
Transportar el sistema	El sistema es estático	El sistema es de fácil desarmado para transportar		

Fuente: autor

Las opciones de diseño se plantearon uniendo los conceptos que satisfacen las diferentes sub funciones, basándose en cómo está conformado un sistema de bombeo solar. En la tabla 6 se muestra los diseños.

Tabla 6. Opciones de diseño

Diseño 1	Panel monocristalino, que acciona y controla por medio de un inversor solar a una bomba centrífuga vertical, que extrae el flujo por medio de una manguera que deposita en un tanque que puede ser transportado en vehículo y el sistema es estático.
Diseño 2	Panel policristalino, que acciona y controla por medio de un inversor de onda cuadrada a una bomba sumergible que transporta el flujo por medio de manguera y deposita en un tanque a tres metros de la superficie y el sistema es de fácil desarmado para transportar.
Diseño 3	Panel policristalino, que acciona y controla por medio de un inversor de onda senoidal a una bomba sumergible que transporta el flujo por medio de manguera y deposita en un tanque a tres metros de la superficie y el sistema es de fácil desarmado para transportar.
Diseño 4	Panel amorfo, que acciona y controla por medio de un inversor de onda cuadrada perfecta a una bomba de desplazamiento positivo que transporta el flujo por tubería depositándolo en un tanque que puede ser transportado por los usuarios y el sistema es de fácil desarmado para transportar.
Diseño 5	Panel monocristalino, que acciona y controla por medio de un inversor de onda senoidal a una bomba tipo lapicero que transporta el fluido por tubería a un tanque a 3 metros de la superficie y el sistema es de fácil desarmado para transportar.
Diseño 6	Panel policristalino, que acciona y controla por medio de un inversor de bomba solar a una bomba tipo lapicero que transporta el fluido por manguera a un tanque a 3 metros de la superficie y el sistema es de fácil desarmado para transportar.

Fuente: autor

3.3 MATRIZ PUGH

La matriz pugh o método de matriz de decisión es una metodología de diseño o herramienta cuantitativa que permite comparar opciones entre sí mediante un arreglo multidimensional (matriz de decisiones). El primer paso es identificar los criterios que serán evaluados. Los criterios son las especificaciones de diseño que

se deben tener en cuenta para seleccionar los mejores dispositivos que conformen el sistema. La figura 15 ilustra la estructura básica de una matriz de decisión.

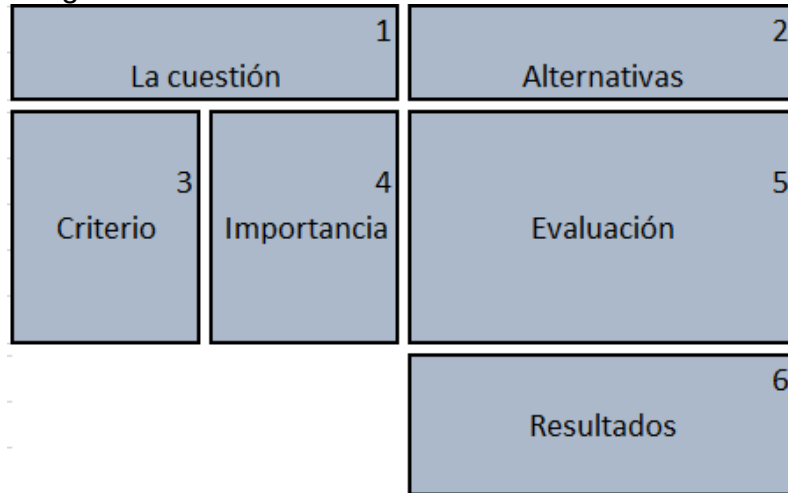
Los pasos para desarrollar una matriz pugh son:

1. Establecer el tema al cual se le aplicará la metodología mencionada.
2. Seleccionar las alternativas que van a ser comparadas, las cuales son las diferentes ideas desarrolladas en la generación conceptual como la morfología.
3. Escoger los criterios para comparar o evaluar cada una de las alternativas de diseño.
4. En este paso se realiza una ponderación relativa. Es decir, se le asigna a cada criterio un valor.
5. Evaluar alternativas. Para iniciar la evaluación es necesario seleccionar un concepto que se considere el mejor. Este concepto se llamará Datum. Una vez seleccionado este, se procede a evaluar cada uno de los conceptos con respecto al seleccionado. Se asignan valores +1, 0, o -1 para identificar la habilidad que poseen las diferentes alternativas de cumplir con los criterios de evaluación.

Al asignar el valor +1 significa que la habilidad del concepto evaluado para cumplir cierto criterio supera el Datum. En caso que no cumpla con el criterio se da un valor de -1. Además, existen situaciones donde el Datum y el concepto evaluado tienen la misma habilidad, en este caso se asigna el valor de 0.

6. Computar la evaluación de las alternativas con respecto al Datum, además las cifras arrojadas presentan la habilidad que posee cada concepto para cumplir los criterios de comparación e incluso brinda la posibilidad de mejorar el concepto mejor evaluado considerando los aspectos positivos de las demás alternativas.

Figura 15. Estructura básica de la matriz de decisión



Fuente: *The Mechanical Design Process*, David G. Ullman (48).

3.3.1 Aplicación de la matriz pugh. Aplicando esta metodología a los diseños obtenidos en la morfología, se generó una matriz que permitiera decidir cuál de ellos es el más favorable. Dicha matriz se muestra en la Tabla 7.

Como se observa en la Tabla 7 se evaluaron los diseños por medio de 7 criterios distintos, los cuales a su vez fueron valorados según la importancia para el diseño. Dicha importancia fue asignada, estableciendo el valor 7 al criterio considerado más importante y 1 al menos importante.

Los criterios evaluados para cada diseño son:

- Eficiencia del panel:** Esta determina la cantidad de paneles a utilizar debido a la cantidad de energía eléctrica generada por panel, influyendo directamente en el tamaño, transporte, vida útil y costo del diseño.
- Convertor de corriente:** La conversión de corriente en el sistema es determinante dado que los paneles generan CD y las bombas usualmente vienen para trabajar con CA.
- Eficiencia de extracción del fluido:** este criterio se evalúa porque determina la potencia eléctrica requerida por el sistema, influyendo directamente en el cálculo del sistema FV que lo alimenta, la cabeza hidráulica requerida, la posibilidad de existencia de cavitación y en el costo del diseño.
- Transporte del fluido a la superficie:** El modo de transporte del agua influye en las pérdidas de energía del sistema, en el costo y en la posibilidad de que sea un sistema portátil.
- Almacenamiento del fluido:** La manera de almacenar o distribuir el fluido a las comunidades.

Tabla 7. Matriz Pugh

DISEÑO			ALTERNATIVAS DE DISEÑO											
CRITERIOS	IMPORTANCIA	DISEÑO 1		DISEÑO 2		DISEÑO 3		DISEÑO 4		DISEÑO 5		DISEÑO 6		
CRITERIOS	Eficiencia del panel	8	0	0	1	8	0	0	-1	-8	0	0	1	8
	Convertor de corriente	6	1	6	-1	-6	0	0	1	6	-1	-6	1	6
	Eficiencia de extracción del fluido	7	-1	-7	0	0	0	0	0	0	1	7	1	7
	Transporte del fluido a la superficie	3	0	0	1	3	1	3	0	0	1	3	1	3
	Almacenamiento del fluido	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	Vida útil/ mantenibilidad	4	1	4	1	4	0	0	1	4	0	0	1	4
	Portabilidad	2	0	0	1	2	1	2	0	0	1	2	1	2
	Costo	5	-1	-5	1	5	1	5	-1	-5	0	0	1	5
TOTAL			-1		16		10		-2		6		35	

Fuente: autor

- f) **Vida útil/mantenibilidad:** La vida útil y mantenibilidad del sistema es importante en el diseño debido a que el diseño estará ubicado en una zona geográfica de difícil acceso.
- g) **Portabilidad:** Capacidad del diseño de ser desarmado fácilmente y poderse transportar a otra localización, sin embargo si no se puede transportar, se diseñaría para una zona específica.
- h) **Costo:** El costo que tendrán cada uno de los dispositivos del diseño será de gran importancia debido a los pocos recursos que se consideran disponibles para la implementación del proyecto.

Como se observa en la Tabla 7. El diseño 6 y el diseño 2 han obtenido una buena valoración en la eficiencia del panel, dado que la célula policristalina es la que mejor que se adapta a las condiciones climáticas de la zona seleccionada, además los diseños 5 y 6 con la opción de una bomba tipo lapicero que es apta para grandes profundidades y siendo autocebante, evita la cavitación obteniendo un aumento en la calificación de estos diseños.

Por otro lado también se observa que los criterios de transporte de fluido y portabilidad no han sido determinantes en la selección de diseño por el valor de importancia que se le ha dado, aun así le da un aumento a la valoración de los diseños que cuentan con la opción de manguera, puesto que es fácil extraer el

dispositivo y desarmar la instalación para ser transportada en los posibles pozos donde pueda servir el diseño seleccionado.

Los diseños con calificación 1 en el criterio de vida útil y mantenibilidad están bien valorados debido a que soportan adecuadamente las condiciones del terreno.

Finalmente la portabilidad y el transporte del fluido gracias a la implementación de manguera flexible hacen que las opciones de aplicabilidad del diseño sean más amplias en el territorio y además, el costo ha sido factible para los diseños que cuentan con panel poli cristalino, amorfo, bombas sumergibles y manguera flexible.

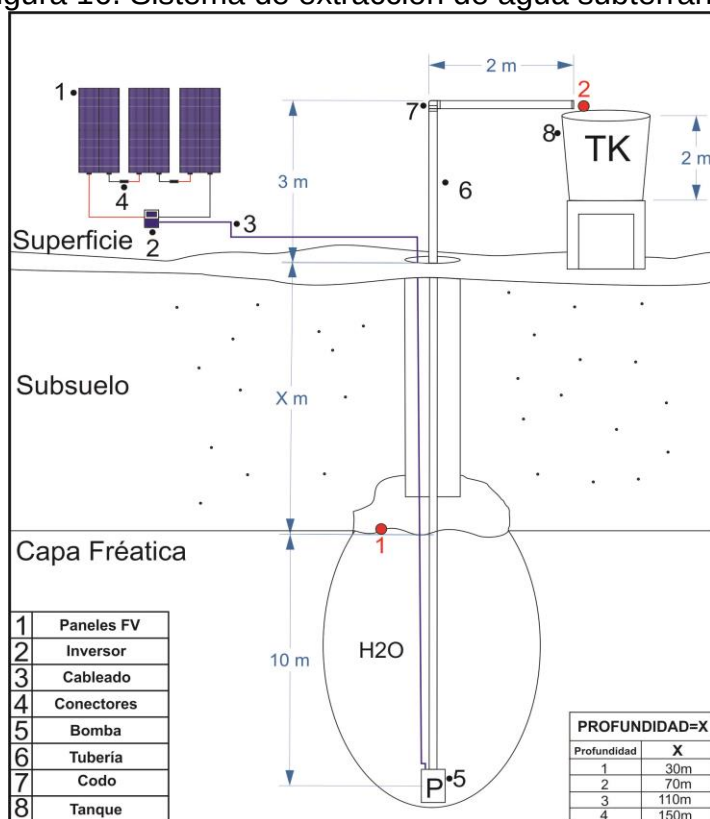
En definitiva, el diseño 6 debido a que los elementos que lo componen demuestran una mejor capacidad de implementarse frente a los demás diseños ha sido el seleccionado con un valor cuantitativo de 35 puntos.

4. CÁLCULOS DEL SISTEMA

En este capítulo se presentan los cálculos ingenieriles realizados en el diseño del sistema de extracción de aguas subterráneas con base en los datos recopilados en entidades gubernamentales como el IDEAM, SGC, IGAC, DANE e informaciones del marco referencial.

En la figura 16 se muestra el esquema utilizado para el diseño del sistema hidráulico y eléctrico. Este muestra los paneles FV (1) que transforman la luz solar en energía eléctrica y que por medio de un inversor (2) convierte la corriente continua generada por los paneles en corriente alterna. Dicha corriente acciona la bomba tipo lapicero (5) ubicada a 10 metros por debajo de la capa freática para extraer agua, la cual es transportada por manguera (6) hasta depositarla a una altura de 3 metros sobre la superficie en un tanque de almacenamiento (8).

Figura 16. Sistema de extracción de agua subterránea



Fuente: autor

4.1 CÁLCULOS HIDRÁULICOS

La organización mundial de la salud (OMS) indica que el consumo diario mínimo de agua para satisfacer la necesidad en cuanto a bebida, higiene personal y la cocina, es de 20 litros (49).

Por otra parte, la ubicación seleccionada tiene en sus alrededores 2 comunidades que se pretenden impactar, Lanapa y Morokos. Teniendo en cuenta que cada comunidad tiene un promedio de 230 habitantes, por lo que se considera un aproximado de 500 personas a beneficiar.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, el volumen diario requerido a extraer es:

$$Volumen = 500_{personas} * 20L = 10000L = 10 m^3 \text{ Al día}$$

Para el cálculo del caudal se debe dividir el volumen calculado en las horas que va a ser extraída. Las horas de bombeo se determinaron a partir de las horas de sol al día en que la radiación puede ser aprovechada al máximo en la ubicación, que en promedio son promedio de 6 horas (50). Por lo cual se considera extraer el agua en el tiempo que estará expuesto directamente el sistema eléctrico a la incidencia de la luz solar.

$$Q = \frac{10m^3}{6h} = 1,66 \frac{m^3}{h} = 4,61 * 10^{-4} \frac{l}{s} = 7,30 \text{ GPM}$$

Teniendo en cuenta que la temperatura del agua subterránea se encuentra en un promedio de 35°C, la viscosidad cinemática y peso específico son:

$$\nu = 7,22 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

$$\gamma = 9,75 \frac{kN}{m^3}$$

Para la velocidad en tuberías, Mott recomienda que la velocidad de descarga se considere entre el rango de 1,2 y 3 $\frac{m}{s}$. Se decidió utilizar una velocidad media de 1,8 $\frac{m}{s}$.

$$v = 1,8 \frac{m}{s} = 6480 \frac{m}{h}$$

Al realizar un balance energético en la ecuación general de la energía se obtuvo:

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

En la figura 16 se toman como puntos de referencia 1 y 2 de color rojo. Dado que dichos puntos se encuentran a la atmosfera se pueden cancelar las presiones. $Z_1 = 0$ dado que es el punto de referencia. La v_1 es igual a 0 ya que se encuentra en un área extensa que ocasiona su estado estático obteniendo:

$$\text{Ec (1)} \quad \cancel{\frac{p_1}{\gamma}} + \cancel{\frac{v_1^2}{2g}} + z_1 + h_a - h_L = \cancel{\frac{p_2}{\gamma}} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

Por otro lado a partir de la ecuación de continuidad:

$$\text{Ec (2)} \quad Q = v * A$$

Y la ecuación del área de la tubería:

$$\text{Ec (3)} \quad A_{\text{tubería}} = \frac{\pi * D^2}{4}$$

De las ecuación 2 y 3 se obtuvo:

$$\text{Ec (4)} \quad Q = v * \frac{\pi * D^2}{4}$$

De la ecuación 4 se despeja D para hallar el diámetro de la manguera

$$D = \left(\frac{Q * 4}{v * \pi} \right)^{0.5}$$

Al reemplazar los valores obtenidos se encontró que el diámetro es:

$$D = \left(\frac{0,000461111 * 4}{(1,8 * \pi)} \right)^{0.5} = 0.018096 \text{ m} = 18,096 \text{ mm}$$

El diámetro de manguera flexible más cercano es de diámetros 19,05 mm que equivalen a $\frac{3}{4}$ de pulgada para Manguera flexible. Con este nuevo diámetro de manguera hallado se corrige la velocidad y se despeja de la ecuación 2:

$$v = \left(\frac{1,66 * 4}{0,01905^2 * \pi} \right) = 1,5661 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Con la velocidad corregida se procede a calcular las pérdidas del sistema, para lo cual se necesita calcular la carga dinámica total.

- **Carga dinámica total (TDH)**

$$H_A = H_{manometrica} + H_{perdidas}$$

$$H_{perdidas} = hL_{primarias} + hL_{secundarias}$$

Teniendo en cuenta que los pozos presentes en el departamento tienen profundidades entre 30 y 160 metros de profundidad hasta la capa freática y que no se conoce con exactitud la profundidad del pozo seleccionado, se decidió calcular el diseño para diferentes profundidades seleccionadas en ese rango cada 40 metros empezando en 30 metros de la siguiente manera, 30, 70, 110 y 150 metros. Estas profundidades fueron utilizadas como altura manométrica para los cálculos hidráulicos.

- **Pérdidas en la tubería ($hL_{primarias} - h_L$)**

Se requiere calcular el número de Reynolds con la Ecuación 6 y la rugosidad relativa con la Ecuación 7 para poder calcular el factor de fricción en la tubería y así determinar las pérdidas del sistema. El factor de fricción se puede determinar utilizando el diagrama de Moody o calculándolo a través de la Ecuación 8 que permite el cálculo directo de este para un flujo turbulento (30).

$$\text{Ec (6)} \quad N_R = \frac{v * D}{\nu}$$

$$\text{Ec (7)} \quad \frac{D}{E} = \text{rugosidad relativa}$$

$$\text{Ec (8)} \quad f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 \left(\frac{D}{E} \right)} + \frac{5,74}{N_R^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Para obtener el valor de número de Reynolds se reemplazó la velocidad, el diámetro y la viscosidad cinemática en la Ecuación 6 y se obtuvo una cifra de 30.576,7 que implica un flujo turbulento.

Para hallar la rugosidad relativa se necesita la rugosidad del conducto. Debido a las condiciones geográficas y condiciones químicas del agua se seleccionó manguera flexible de presión cuya rugosidad:

$$E = 3,6 * 10^{-4} m \text{ (32)}$$

Con el diámetro y la rugosidad de la tubería se reemplazó en la Ec (7) y se obtuvo que la rugosidad relativa es igual a 53.769.

Al tener el número de Reynolds y la rugosidad relativa, se reemplazó en la Ec (8) y se obtuvo que el factor de fricción es igual a 0,02166.

Hallado el factor de fricción se procede a hallar h_L - las pérdidas en la tubería reemplazando en la ecuación de Darcy con cada una de las alturas manométricas de las profundidades a evaluar.

$$\text{Ec (9)} \quad H_L = f \frac{L \cdot v^2}{D \cdot 2g}$$

- **Pérdidas en los accesorios ($h_{L_{\text{Secundarias}}} - h_F$)**

Para hallar la pérdida en accesorios se emplea la ecuación

$$\text{Ec (10)} \quad h_F = \sum k = \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

Sumando las pérdidas de los accesorios que se ilustran en la Figura 16:

- 1 Codo

Seguidamente se procedió a hallar la potencia de la bomba con la ecuación:

$$\text{Ec (11)} \quad P = \left(\frac{H_A \cdot \gamma \cdot Q}{n_B} \right) g$$

Utilizando las formulas anteriores y las especificaciones de diseño se obtiene la potencia para las diferentes profundidades. Los resultados se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Características del resultado de cálculo de la bomba y referencia de bomba seleccionada

Profundidad		Longitud manguera	H manométrica(m)	Potencia	
				kW	HP
1	30 m	45	43	0,255	0,342
2	70 m	85	83	0,491	0,658
3	110 m	125	123	0,726	0,974
4	150 m	165	163	0,962	1,290

Fuente: autor

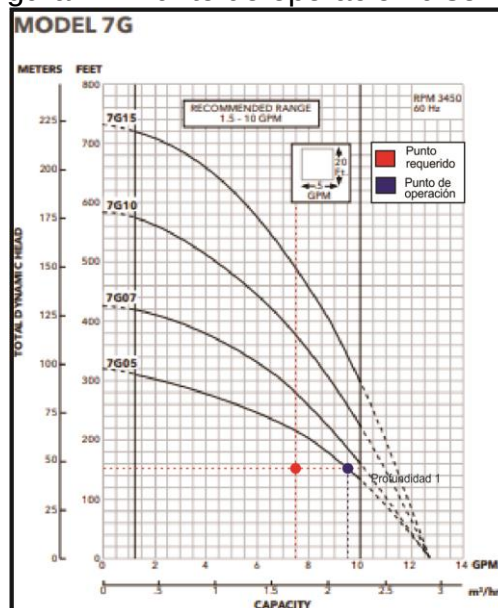
A partir de la potencia calculada se buscó en el mercado de bombas y se preseleccionaron las siguientes marcas: Lorentz, Bernes, Altamira y Goulds para seleccionar la bomba que mejor se adecuaba. De las bombas mencionadas fue elegida la marca Goulds debido a su alta eficiencia, el menor consumo energético y precio asequible. En el Anexo B se puede apreciar la ficha técnica de las bombas Goulds.

4.1.1 Punto de operación de las bombas. El punto de operación de la bomba se determina con la gráfica proporcionada por el fabricante de la referencia seleccionada ubicando inicialmente en esta el punto de requerimiento de potencia hallada para cada una de las diferentes profundidades.

En las figuras 17 y 18 los trazos de color rojo representa el punto requerido por el sistema según los cálculos realizados (cabeza – caudal) y los trazos de color azul representan el punto de operación seleccionado para cada una de las profundidades.

En la figura 17 se observa el punto de operación para la profundidad 1. Los puntos de operación han sido obtenidos manteniendo la misma cabeza calculada y aumentando el caudal, hasta encontrar la línea de operación de la bomba. Se decidió aumentar el caudal porque al hacerlo aumenta también la velocidad de extracción de flujo, con lo cual disminuirá el tiempo de trabajo de la bomba y del sistema eléctrico, ocasionando una reducción de gasto energético permitiendo además obtener el volumen total en menos tiempo.

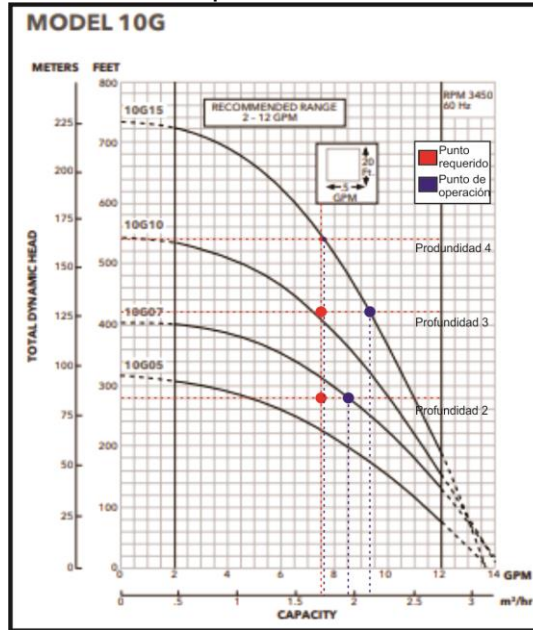
Figura 17. Punto de operación diseño 1



Fuente: Sacado y editado de Bombas Goulds (51).

Por otro lado en la figura 18 se realizó el mismo análisis que la anterior figura pero esta vez para las profundidades 2, 3 y 4.

Figura 18. Punto de operación de los diseños 2,3 y 4



Fuente: Sacado y editado de Bombas Goulds (51)

Los datos obtenidos del punto de operación de las bombas seleccionadas para cada una de las profundidades se muestran en la Tabla 9.

4.1.2 Eficiencia de la bomba. Debido a que el fabricante de la bomba no menciona la eficiencia en la ficha técnica, se procedió a determinar esta, a partir de los datos obtenidos en la Tabla 9. La eficiencia de la bomba en el punto de operación se calculó empleando la fórmula:

$$Ec (12) e_B = \frac{\text{Potencia hidráulica suministrada al fluido}}{\text{Potencia Eléctrica}}$$

En la Tabla 9 se presentan los datos de potencia hidráulica y eficiencia calculados para cada bomba.

Tabla 9. Características de operación de la las bombas seleccionadas

Profundidad	Referencia bomba Goulds	Potencia de la Bomba seleccionada (kW)	Caudal-Q (m ³ /h)	Cabeza	Potencia hidráulica (kW)	Eficiencia
1	7G05	0,372	2,157	46	0,267	71%
2	10G07	0,559	1,953	85	0,451	80%
3	10G15	1,118	2,135	128	0,740	66%
4	10G15	1,118	1,728	165	0,770	68%

Fuente: autor

Finalmente en la Tabla 9 se concluye que para las diferentes profundidades se podrán utilizar 3 tipos de bomba, la referencia 7G05 para la profundidad 1, la referencia 10G07 para la profundidad 2 y debido a que la referencia 10G15 es de gran capacidad sirve para las profundidades 3 y 4, además también se puede ver que el caudal cambio respecto al valor en los cálculos iniciales, causando que la velocidad aumente y se reduzca el tiempo de obtención del volumen total. Dichos tiempos se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Horas de trabajo de las bombas en el punto de operación para extraer un volumen de 10 m³

Profundidad	Tiempo (h)
1	4,635
2	5,120
3	4,684
4	5,788

Fuente: autor

4.2 CÁLCULOS DEL SISTEMA FV

En esta sección se presentan los cálculos del sistema FV en base a la radiación solar de la ubicación seleccionada en el municipio de Uribia.

Los cálculos se hicieron de forma manual y fueron comprobados por medio de la utilización de una “Calculadora solar”. La calculadora solar (52) es una aplicación de internet donde se pueden simular los consumos eléctricos de instalaciones, para calcular el número de paneles, la potencia y las ramificaciones que se necesita para suplir el consumo que se quiere evaluar. Una vez realizada la simulación, la calculadora solar genera un informe donde explica paso a paso la información obtenida en la simulación del consumo valorado.

Para calcular el sistema FV se inicia por conocer la energía media diaria necesaria (L_{MDC}) en el mes crítico empleando la siguiente ecuación:

$$\text{Ec (13)} \quad L_{MDC} = \left(\frac{\text{Consumo diario critico}}{n_{inversor}} \right)$$

El consumo diario crítico (Wh/día) es la energía consumida por la bomba al día, este se obtiene multiplicando la potencia de la bomba por las horas de trabajo. La eficiencia del inversor es del 98 % según el fabricante (45).

Por otra parte se requiere determinar las horas pico solar (HPS), que se definen como la cantidad de horas donde la radiación está en su valor más alta y se calculan utilizando la ecuación 14.

$$\text{Ec (14)} \quad HPS = \frac{R}{I_{CEM}}$$

R es la radiación media diaria en kWh/m², más baja durante el año en la zona donde se va a utilizar el sistema. Como se mencionó anteriormente esta se presenta en el mes de diciembre y tiene un valor de 5,39 kWh/m² día. La potencia de radiación incidente (I_{CEM}), se utilizó con un valor de 1kW/m² ya que es una condición estándar de medida (CEM) sugerida por los fabricantes. Por lo tanto las HPS son 5,39.

Se procede entonces a hallar la energía diaria producida por un panel (E_{DMF}) empleando la ecuación 15.

$$\text{Ec (15)} \quad E_{DMF} = P_{panel} * HPS * PR$$

La potencia del panel es dada por el fabricante del panel (P_{panel}). Para el cálculo manual se utilizó una potencia de panel de 230W según la ficha técnica que se muestra en el Anexo D, panel STP230 – 20/Wd de la marca Suntech. PR es un coeficiente que tiene en cuenta las pérdidas en el módulo FV, se suele adaptar un valor entre 0,8 y 0,9. Por sugerencia de la literatura se tomó como 0,9.

Después de obtener el consumo diario crítico y la energía diaria producida por el módulo, se procede a calcular el número de paneles FV que compone el sistema con la ecuación 16.

$$\text{Ec (16)} \quad N^{\circ} \text{ paneles} = \left(\frac{L_{MDC}}{E_{DMF}} \right)$$

El número de paneles es igual al cociente entre la potencia pico del generador y la potencia pico del panel. En la Tabla 11 en la segunda columna se presenta el número de paneles requerido para cada una de las profundidades.

Como una manera de validar los resultados obtenidos manualmente se realizó una simulación en la calculadora solar antes mencionada. Al hacer uso de esta aplicación se modificaron los datos del regulador y el inversor para obtener un resultado aproximado, además se le especificó al simulador que el sistema no posee baterías.

La calculadora solar está sincronizada con diferentes marcas de paneles e inversores, además de utilizar aplicaciones para obtener el valor de radiación solar en la ubicación que se seleccionó. A partir de estos datos la calculadora solar es capaz de obtener valores precisos para el diseño de un sistema FV.

Para simular en la calculadora solar se debe ingresar los datos de la instalación: la zona especificada, el tipo de corriente, el consumo eléctrico del dispositivo al día y el uso que tendrá en el transcurso del año. La inclinación y desorientación se pueden modificar pero la calculadora simula los mejores valores que considere correctos. En la figura 19 se ilustra la calculadora solar.

Figura 19. Datos de la instalación

The screenshot shows the 'Calculadora solar' interface with the following sections:

- DATOS DE LA INSTALACION:** Includes a map selection button, latitude (12.069463), and longitude (-71.158432).
- TIPO DE ENERGIA:** Radio buttons for 'Corriente alterna' (selected) and 'corriente continua', with a voltage dropdown set to '230 V'.
- CONSUMOS ENERGIA POR DIA:** Input fields for 'Electrodomésticos' (2074.626 Wh/día) and 'Iluminación' (0 Wh/día), with a 'TOTAL CONSUMO' of 2074.626 Wh/día.
- % DE CONSUMO POR MESES:** A table for monthly consumption percentages.
- Uso habitual:** A table showing 100% consumption for all months from January to December.
- CALCULAR:** A blue button at the bottom right.

% DE CONSUMO POR MESES											
Uso habitual											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Fuente: Calculadora solar (52)

En la calculadora solar se simularon los sistemas para las cuatro profundidades analizadas en este proyecto. Los informes obtenidos de las distintas simulaciones se pueden ver en el Anexo F.

En los informes se puede ver el consumo diario del dispositivo evaluado, la inclinación exacta que deberán tener los paneles, el número de paneles que conformaran el sistema. Además de otros datos interesantes como:

1. El rendimiento específico que tendrá el sistema lo que proporcionaría un consumo más exacto del sistema.

2. El ángulo de inclinación que deben tener los paneles por mes, durante el transcurso del año para recibir una mejor incidencia del sol.
3. Las HPS mensuales y anuales que determinarían el mes donde se presenta menor radiación solar en el año.
4. Los elementos específicos por el cual estaría conformado el sistema.
5. El total de kg/año de CO₂ evitados.

En las HPS que proporciona el informe se determina que el mes con menor radiación y por consiguiente el más desfavorable es el mes de diciembre ya que tiene un valor de 5,98. Al comparar este valor con el obtenido en los cálculos manuales (5,39) se evidencia que existe una variación de 9 % de diferencia, lo cual se determinó aceptable dado que el número de paneles para cada una de las profundidades resultaron iguales como se evidencia en la Tabla 11.

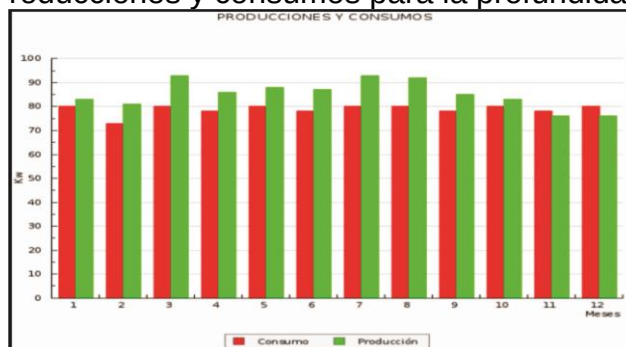
Tabla 11. Datos obtenidos en ecuaciones y calculadora solar

Profundidad	N° paneles cálculo manual	N° paneles calculadora solar	Panel calculadora	Eficiencia inversor calculadora solar
1	2	2	Luxor230	90 %
2	3	3	Luxor230	94 %
3	6	6	Luxor230	94 %
4	7	7	Luxor230	97 %

Fuente: autor

El informe adicionalmente genera una gráfica que muestra la energía producida y el consumo mes a mes. Dicha grafica se ilustra en la figura 20, como se observa para los primeros diez meses del año la producción de energía cumple satisfactoriamente el consumo requerido pero para los dos últimos meses del año se ve que el consumo es un poco mayor a la producción, lo que ocasionaría que el sistema tenga un menor rendimiento.

Figura 20. Producciones y consumos para la profundidad 1 en el año



Fuente: Calculadora solar (52).

5. ANÁLISIS DE COSTOS

Los costos de inversión fueron evaluados para cada una de las diferentes profundidades, tanto para los cálculos manuales como los obtenidos por la calculadora solar y estos se presentan en la Tabla 12. Los costos obtenidos en el mercado se han puesto sin el valor del IVA debido a que la ley 1715 de 2014 exenta a los dispositivos que promuevan las FNCE.

En la Tabla 12 se compara el sistema Goulds – Suntech frente al sistema Goulds – Luxor. Ambos sistemas utilizan bombas tipo lapicero marca Goulds, la diferencia entre estos dos sistemas es que el primero utiliza el panel seleccionado en los cálculos manuales (Suntech) y el segundo utiliza el panel seleccionado por la calculadora solar (Luxor).

En la Tabla 12, se puede observar que el sistema Goulds – Suntech es más económico que el otro para las cuatro diferentes profundidades del diseño, esto principalmente porque la marca de paneles Luxor es más costosa. La diferencia promedio entre los precios es del 11 % y teniendo en cuenta que el costo del proyecto, es el tercer criterio de diseño con mayor importancia en la matriz pugh, se decidió que el sistema Goulds – Suntech es la mejor opción.

Por otro lado los paneles Suntech presentan una ventaja frente a los paneles Luxor (Anexo E) debido a su eficiencia de célula de 14,1 % frente a 14,07 % del otro fabricante, es decir, se obtiene prácticamente la misma eficiencia a un menor costo del panel.

Comparando los paneles existentes en el mercado se encuentran algunos más económicos que el Suntech, pero con menores eficiencias y otros con mayores eficiencias pero con costo más elevado, por lo que se considera que el panel Suntech es la mejor opción.

También se encuentran bombas tipo lapicero de precios más bajos, sin embargo, estas requieren más potencia para trabajar en los puntos de operación requeridos y tendrían un mayor consumo energético elevando así los costos del sistema eléctrico fotovoltaico.

Comparando el precio del diseño Goulds - Suntech entre las diferentes profundidades, se obtiene que la diferencia del costo para la profundidad uno y la profundidad cuatro es del 26,1 %, con un valor aproximado de \$3'052.500 pesos. Esto implica que el diseño para la profundidad cuatro no es mucho más costoso que para la profundidad uno, por lo tanto, este podría ser implementado en las diferentes profundidades de pozo existentes en la Guajira sin implicar un gran sobre costo en la resolución del problema.

A las propuestas de diseño para las diferentes profundidades se les dio un valor de salvamento del 10%, además el Horizonte de estas es igual dado que los fabricantes proveen la misma vida útil para sus dispositivos, la cual es de 20 años.

Tabla 12. Costos del diseño de las diferentes profundidades

PROFUNDIDAD	1			2			3			4		
ítems	C	Precio unitario	Total	C	Precio unitario	Total	C	Precio unitario	Total	C	Precio unitario	Total
Dispositivos sistema eléctrico												
Paneles Suntech	2	\$ 235.000	\$ 470.000	3	\$ 235.000	\$ 705.000	6	\$ 235.000	\$ 1.410.000	7	\$ 235.000	\$ 1.645.000
Paneles Luxor	2	\$ 552.922	\$ 1.105.844	3	\$ 552.922	\$ 1.658.766	6	\$ 552.922	\$ 3.317.532	7	\$ 552.922	\$ 3.870.453
Inversor	1	\$ 936.000	\$ 936.000	1	\$ 936.000	\$ 936.000	1	\$ 936.000	\$ 936.000	1	\$ 936.000	\$ 936.000
Cable (m)	45	\$ 4.500	\$ 202.500	85	\$ 4.500	\$ 382.500	125	\$ 4.500	\$ 562.500	165	\$ 4.500	\$ 742.500
Soporte Paneles	1	\$ 400.000	\$ 400.000	1	\$ 400.000	\$ 400.000	2	\$ 400.000	\$ 800.000	2	\$ 400.000	\$ 800.000
Conectores	2	\$ 5.500	\$ 11.000	3	\$ 5.500	\$ 16.500	6	\$ 5.500	\$ 33.000	7	\$ 5.500	\$ 38.500
Dispositivos sistema hidráulico												
Bomba Goulds	1	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000	1	\$ 2.500.000	\$ 2.500.000	1	\$ 2.980.000	\$ 2.980.000	1	\$ 2.980.000	\$ 2.980.000
Manguera Acuoflex	45	\$ 2.750	\$ 123.750	85	\$ 2.750	\$ 233.750	125	\$ 2.750	\$ 343.750	165	\$ 2.750	\$ 453.750
Adaptador	2	\$ 28.500	\$ 57.000	2	\$ 28.500	\$ 57.000	2	\$ 28.500	\$ 57.000	2	\$ 28.500	\$ 57.000
Codo	1	\$ 3.500	\$ 3.500	1	\$ 3.500	\$ 3.500	1	\$ 3.500	\$ 3.500	1	\$ 3.500	\$ 3.500
Tanque 10 m³	1	\$ 4.834.403	\$ 4.834.403	1	\$ 4.834.403	\$ 4.834.403	1	\$ 4.834.403	\$ 4.834.403	1	\$ 4.834.403	\$ 4.834.403
Total Suntech - Goulds	\$ 8.638.153			\$ 9.668.653			\$ 11.160.153			\$ 11.690.653		
Total Luxor - Goulds	\$ 9.273.997			\$ 10.622.419			\$ 13.067.685			\$ 13.916.106		
Mano de obra												
Costo de investigación por parte del autor	960	\$ 13.802	\$ 13.249.853	960	\$ 13.802	\$ 13.249.853	960	\$ 13.802	\$ 13.249.853	960	\$ 13.802	\$ 13.249.853
Director de Proyecto de Grado	\$ 1.900.000			\$ 1.900.000			\$ 1.900.000			\$ 1.900.000		
Mano de obra	\$ 1.727.631			\$ 1.933.731			\$ 2.232.031			\$ 2.338.131		
Valor de salvamento	\$ 863.815			\$ 966.865			\$ 1.116.015			\$ 1.169.065		
Total	\$ 23.615.636			\$ 24.852.236			\$ 26.642.036			\$ 27.278.636		

Fuente: proveedores varios y autor

En la recopilación de información de sistemas de bombeo similares se encontraron empresas que trabajan directamente con bombas diseñadas específicamente para trabajar con energía FV. De estas marcas se resalta Lorentz, por ser considerada

una de las marcas líderes del mercado en el mundo. Sin embargo, no fue posible la obtención de cotizaciones de un sistema completo de bombeo solar.

Se prosiguió entonces a la búsqueda del precio unitario de las partes que conforman los sistemas de bombeo de la marca Lorentz. En esta búsqueda se logró cotizar el costo unitario de la bomba Lorentz que haría el mismo trabajo que el requerido para la profundidad cuatro, bomba PS4000 C-SJ3-32 (Anexo C). Esta tiene un costo de \$ 16'333,414 pesos y al comparar este valor con el costo del diseño para la profundidad cuatro se resalta que solo la bomba marca Lorentz es 28,4 % más costosa que todo el sistema diseñado en este proyecto, eso sin tener en cuenta el aumento que tendría el sistema Lorentz al añadir el costo del sistema eléctrico.

Finalmente debido a la diferencia de costo entre el diseño propuesto en este proyecto y el diseño que se encuentra en el mercado, se concluye que esta solución planteada es de gran viabilidad por los bajos costos de inversión que tendría al realizarlo, la buena eficiencia y la fácil mantenibilidad, además de que se logró diseñar un sistema útil para cualquier pozo existente en la región.

6. CONCLUSIONES

La alta Guajira es una región apta para la extracción de agua subterránea a través de sistemas de bombeo solar, debido a que se presentan radiaciones de 5 – 5,5 kW/m², se encuentran 104 pozos subterráneos y es donde habitan más comunidades con la necesidad del agua.

Utilizando la metodología pugh, se obtuvo que la bomba tipo lapicero se adapta adecuadamente a las grandes profundidades de los pozos y se puede accionar por paneles policristalinos, el cual es el tipo de panel que mejor soporta las altas temperaturas y absorbe eficientemente la radiación.

En el estudio de sistemas de bombeo se encontró que las bombas tipo lapicero pueden extraer el agua a la superficie por medio de manguera flexible, que además de reducir los costos del uso de tubería, ayuda a la fácil extracción del dispositivo y cómodo desarmado que proporciona el fácil traslado.

El diseño para la profundidad cuatro además de ser un buen diseño para la profundidad de 150 de metros también lo es para las demás, debido a que este puede ser adaptado para instalarse en las otras profundidades y el costo del diseño no es mucho más elevado. Además tiene un bajo costo frente a los diseños que se adquieren en el mercado de energía solar fotovoltaica.

El diseño podrá aplicarse en cualquier zona no interconectada donde se hallen pozos subterráneos, que tenga una radiación aceptable y no supere la cabeza dinámica de la bomba.

7. RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio costo - beneficio para poder aplicar a la resolución del artículo 10 de la ley 1715 de 2014, la cual menciona que el *fondo de energías no convencionales y gestión eficiente de energía*, podrá financiar parcial o totalmente a proyectos que utilicen FNCE en estratos 1, 2 y 3.
- Se requiere obtener un estudio más exacto de la cantidad de personas que habitan en cada comunidad para poder determinar el volumen exacto de agua que se extraerá.
- Cuando termine de operar la bomba y en épocas de sequía, el diseño podrá ser modificado para establecerse como fuente de electricidad y servir a las comunidades. La modificación para este correspondería a la adición de equipos como el banco de baterías, regulador e inversor adecuados para los dispositivos que manejen en la comunidad.
- Aunque los parámetros fisicoquímicos dan una neutralidad en el agua, es importante poder garantizar la completa potabilidad de la misma, por eso se recomienda estudiar la calidad de esta o añadir un proceso de purificación al diseño.
- Estudiar la posibilidad de adecuar un sistema de acueducto desde el tanque donde es depositada el agua extraída a las comunidades de la zona.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Biblioteca Luis Angél Arango del Banco de la República.** Toda Colombia. [En línea] 07 de Agosto de 2010. [Citado el: 30 de Agosto de 2017.] <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/la-guajira.html>.
2. **Rodriguez, Felipe Rodriguez.** Extractivismo Colombia. [En línea] 08 de Octubre de 2015. [Citado el: 30 de Agosto de 2017.] <http://extractivismoencolombia.org/la-desviacion-del-rio-rancheria-un-crimen-de-lesa-humanidad/>.
3. **INDEPAZ.** INDEPAZ. [En línea] 05 de Noviembre de 2012. [Citado el: 30 de Agosto de 2017.] http://www.indepaz.org.co/blogs/agua/wp-content/uploads/2012/11/Documento-final-AGUA_051112.pdf.
4. **IDEAM.** www.IDEAM.GOV. [En línea] [Citado el: 07 de 30 de 2017.] <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/hidrologia>.
5. **Rodrigo, Victor, y otros.** *Provisión de agua mediante bomba neumatica accioanda con energía solar a una población rural dispersa.* Villa mercedes - Argentina : Universidad Nacional de San Luis - Facultad de Ingeniería y Ciencias Económico Sociales.
6. **REPÚBLICA DE COLOMBIA - GOBIERNO NACIONAL.** Ley N° 1715. *POR MEDIO DE LA CUAL SE REGULA LA INTEGRACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES AL SISTEMA ENERGÉTICO NACIONAL.* Bogotá : s.n., 2014.
7. **MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE.** Colombia hace parte de los países que se comprometen a frenar el cambio climático. [En línea] 21 de Abril de 2016. [Citado el: 14 de Marzo de 2018.] <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias-asuntos-cambio-climatico/2275-colombia-hace-parte-de-los-paises-que-se-comprometen-a-frenar-el-cambio-climatico..>
8. **EL ESPECTADOR.** El pueblo Wayúu que aprendió a vivir sin agua en La Guajira. [En línea] 03 de Abril de 2019. [Citado el: 12 de Abril de 2019.] <https://www.elespectador.com/noticias/nacional/el-pueblo-wayuu-que-aprendio-vivir-sin-agua-en-la-guajira-articulo-848510>. 848510.

9. **negocios, Redacción.** El espectador. [En línea] 13 de Enero de 2013. [Citado el: 30 de Octubre de 2017.] <https://www.elespectador.com/noticias/economia/20-anos-mas-sin-cobertura-nacional-de-energia-articulo-396417>. 396417.

10. *Perspectivas de Comunidades Indígenas de la Guajira Frente al Desarrollo Sostenible y el Abastecimiento Energético.* **Ojeda, Edgar, Candelo, Jhon y Silvia Ortega, Jorge.** 11, s.l. : ESPACIOS, 2017, Vol. 38. 0798 1015.

11. **IPSE (Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las ZNI).** *Informe Rendición Social de Cuentas.* Bogotá : IPSE, 2015 - 2016. IPSE-DO-F25.

12. **IDEAM.** IDEAM. [En línea] [Citado el: 22 de Marzo de 2019.]

13. —. atlas interactivo. [En línea] 2014 - 2015. [Citado el: 23 de Mayo de 2018.] <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.

14. *¿Ha Sido Efectiva La Promoción De Soluciones Energéticas En Las Zonas No Interconectadas (ZNI) En Colombia?: Un Análisis De la Estructura Institucional.* **Flórez, Jorge, Tobón, David y Castillo, Gustavo.** 38, Bogotá : Pontificia Universidad JAVERIANA, 2009, Vol. 22. 219245.

15. *Disponibilidad, cantidad y calidad del recurso hídrico en la Guajira en el siglo XXI.* **Escobar, P y Iveth, D.** Bogotá : Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia, 2014. 55242266.

16. **Ministerio de cultura - República de Colombia.** Ministerio de cultura. [En línea] [Citado el: 18 de 11 de 2017.] <http://www.mincultura.gov.co/areas/poblaciones/noticias/Documents/Caracterizaci%C3%B3n%20del%20pueblo%20Wayu%C3%BA.pdf>.

17. **Tanny.** Los wayúu. Bogotá : s.n., 2018.

18. **Opinión Caribe.** Opinión Caribe Expresión de región. [En línea] 11 de Mayo de 2016. [Citado el: 14 de Marzo de 2018.] <https://opinioncaribe.com/2016/05/11/9659/>.

19. **Alcaldía de Uribia - La Guajira.** Todo por Uribia. [En línea] [Citado el: 10 de Agosto de 2018.] <http://www.uribia-laguajira.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>.

20. **DANE.** Alianza por el Agua y La Vida de La Guajira. [En línea] Agosto de 2015. [Citado el: 16 de Febrero de 2019.] https://geoportal.dane.gov.co/v2/images/blog/guajira/Presentacion_La_Guajira.pdf.

21. —. Resguardos. Bogotá : s.n., 2019.

22. **Servicio Geologico Colombiano.** Modelo Hidrogeológico del Departamento de La Guajira. [ed.] Grupo de Exploración de Aguas Subterráneas Geociencias Básicas. Bogotá : SGC, 2016.

23. **GRANDA, GIULIANA.** Prezi. *Sistema de Pozos Profundos*. [En línea] 18 de Septiembre de 2013. [Citado el: 12 de Noviembre de 2018.] <https://prezi.com/awc73hgmqyd-/sistema-de-pozos-profundos/>.

24. **Organización Mundial de la Salud.** Agua: OMS. [En línea] 7 de Febrero de 2018. [Citado el: 13 de Enero de 2019.] <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>.

25. **EL TIEMPO.COM.** A pedalazos, comunidades wayús reactivaron pozos de agua . *El Tiempo*. 2016, 16634301.

26. **SANCHEZ, MIGUEL.** *Energía solar Fotovoltaica*. España : Limusa, 2010. 9789681871987.

27. **Mogrovejo, Paulo y Diego, Quizhpe.** DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA PROTOTIPO PARA EL BOMBEO DE AGUA MEDIANTE ENERGÍA SOLAR. *Tesis de Grado*. Loja - Ecuador : Universidad Nacional de Loja, 2007.

28. **Solorzano, Ricardo.** *Hidraulics&Pneumatics. Principios Ingenieriles Básicos - Bombas Hidráulicas*. [En línea] 05 de Junio de 2016. [Citado el: 04 de Octubre de 2017.] <https://www.hydraulicspneumatics.com/blog/principios-ingenieriles-b-sicos-bombas-hidr-ulicas>.

29. **Mataix, Claudio.** *Mecanica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Madrid : Ediciones del Castillo S.A., 2002. 8421901753.
30. **Mott, Robert L.** *Mecánica de fluidos*. México : Pearson Educación, 2006. 9702608058.
31. **Herramientas eléctricas y accesorios.** DE MAQUINAS Y HERRAMIENTAS. *¿Cómo elegir una bomba de agua para pozos? Componentes, tipos y recomendaciones prácticas*. [En línea] 24 de Agosto de 2016. [Citado el: 13 de Noviembre de 2018.] <https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-electricas-y-accesorios/como-elegir-bomba-agua-para-pozos>.
32. **PAVCO.** Manual Técnico. *Acuaflex*. [En línea] [Citado el: 13 de 04 de 2019.] <https://pavco.com.co/download/5>.
33. **M.M., Vicente.** *Instalaciones generadoras fotovoltaicas (un cambio hacia la sostenibilidad)*. Madrid : S.A. EDICIONES PARANINFO, 2015. 9788428337243.
34. **CELSIA.** Celsia. [En línea] 07 de Junio de 2018. [Citado el: 26 de Noviembre de 2018.] <https://blog.celsia.com/requisitos-energia-solar-empresas-hogares>.
35. **MADRID, VICENTE.** *Curso de Energía Solar*. Madrid : Ediciones Mundi-Prensa, 2009. 8484763595.
36. **MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA.** PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS. [aut. libro] Ministerio de minas y energía. *REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS (RETIE)*. Bogotá : s.n., 2013, 20.22, pág. 127.
37. **ICONTEC.** *CÓDIGO ELÉCTRICO COLOMBIANO*. Ministerio de Desarrollo Economico. Bogotá : s.n., 1998. págs. 627 - 635.
38. **SOLARES, TODO SOBRE LOS PANELES.** panelesolaresfotovoltaicos.org. [En línea] [Citado el: 16 de Febrero de 2019.] <https://panelessolaresfotovoltaicos.org/paneles-solares-fotovoltaicos/>.

39. **FERNANDEZ, MANUEL.** *Energía Solar: Electricidad Fotovoltaica.* España : Liberfactory, 2010. 9788499490236.
40. **DELTA VOLT.** Delta Volt. [En línea] [Citado el: 13 de Febrero de 2019.] <https://deltavolt.pe/energia-renovable/energia-solar/panel-solar-cristalino>.
41. **AUTOSOLAR.** [En línea] 09 de Junio de 2017. [Citado el: 23 de Enero de 2019.] Autosolar. Diferencias entre Silicio Monocristalino y Multicristalino o Policristalino.
42. **FERNANDEZ, JOSE.** *COMPENDIO DE ENERGIA SOLAR: FOTOVOLTAICA, TERMICA Y TERMOELECTRONICA.* España : S.A. MUNDI-PRENSA LIBROS, 2010. 9788484764007.
43. **Damia Solar.** Damia Solar - la energía solar al mejor precio. *Para que sirve y cómo se utiliza un regulador de carga?* [En línea] [Citado el: 13 de Marzo de 2019.] https://www.damiasolar.com/actualidad/prova/prova-8-cas_8_3.
44. **MASCARÓS, VICENTE.** *Gestión del Montaje.* España : S.A. EDICIONES PARANINFO, 2016. 9788428338165.
45. **POWERAMP ELECTRONICS.** SOLEME soluciones energéticas. *FICHA TÉCNICA Inversores series SPI.* [En línea] [Citado el: 13 de Enero de 2019.] <http://solemesl.com/wp-content/uploads/Ficha-SPI-series.pdf>.
46. **Google Earth.** Uribia. *La Guajira.* 2019.
47. **NASA.** Power Lac. [En línea] 2019. [Citado el: 12 de Febrero de 2019.] <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>.
48. **Ullman, David G.** *The mechanical Design Process.* New York : Mc Graw Hill, 2010. 2008049434.
49. **Moral, Cristina.** ferrovial blog. *¿Sabes cuántos litros de agua necesita una persona al día?* [En línea] 22 de Marzo de 2015. [Citado el: 13 de Enero de 2019.] <https://blog.ferrovial.com/es/2015/03/sabes-cuantos-litros-de-agua-necesita-una-persona-al-dia/>.

50. **IDEAM.** IDEAM. *Anexo, Promedio Mensuales de Brillo Solar*. [En línea] Junio de 2012. [Citado el: 20 de Abril de 2019.] http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/6.Anexo_Promedios-mensuales-de-brillo-solar.pdf.
51. **GOULDS .** GOULDS WATER TECHNOLOGY. *G Series Slimline Submersible Pumps (5, 7 and 10 GPM) (1/2 to 1 1/2 HP – VFD Compatible)* . [En línea] [Citado el: 23 de Febrero de 2019.] <http://documentlibrary.xylemappliedwater.com/wp-content/blogs.dir/22/files/2012/07/BGSERIES-R3.pdf>.
52. **CalculationSolar.com.** CalculationSolar.com. [En línea] [Citado el: 27 de 04 de 2019.] <http://www.calculationsolar.com/es/calcular.php#>.
53. **Solarmat.** Solarmat. *Bomba Lorentz*. [En línea] [Citado el: 23 de Abril de 2019.] <http://solarmat.es/es/lorentz/conjunto-bomba-lorentz-sumergible-pu4000-c-sj3-32.html>.
54. **Alibaba.** cell Suntech. [En línea] [Citado el: 16 de Abril de 2019.] https://www.alibaba.com/product-detail/2018-new-style-high-quality-60_60780858751.html?spm=a2700.7724838.2017115.23.506b1b6ah8102k.
55. **teknosolar.** Placa solar Luxor. [En línea] [Citado el: 17 de Abril de 2019.] <https://www.teknosolar.com/placa-solar-luxor-eco-line-p60-270w/> .
56. **todo en solar.** Inversor Power Amp. [En línea] [Citado el: 17 de Abril de 2019.] <https://www.todoensolar.com/Inversores/cargadores-PoweramP-con-regulador> .
57. **Ferreteria la campanita.** La campanita. [En línea] 2000. [Citado el: 18 de Abril de 2019.]
58. **ICONTEC.** NORMA TÉCNICA COLOMBIANA -NTC 1486 . [En línea] 2008. [Citado el: 13 de Septiembre de 2018.] http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_15/recursos/01_general/09062014/n_icontec.pdf. 09062014.

ANEXOS

Anexo A. Captaciones de agua en la Guajira y sus formaciones

Anexo B. Ficha técnica bomba tipo lapicero Goulds

Anexo C. Fichas técnicas de bombas Lorenzt

Anexo D. Ficha técnica paneles fotovoltaicos Suntech

Anexo E. Ficha técnica paneles fotovoltaicos Luxor

Anexo F. Cálculo solar para las diferentes profundidades