

**CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO PARA  
APLICACIONES EN ZONAS RURALES**

**NESTOR ARBEY DAZA ALFONSO**

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA, MECATRONICA E  
INDUSTRIAL  
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**  
PAMPLONA, febrero 22 de 2016

**CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO PARA  
APLICACIONES EN ZONAS RURALES**

**NESTOR ARBEY DAZA ALFONSO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO MECÁNICO**

**Director: ELKIN FLOREZ SERRANO**

Doctor en Ingeniería Mecánica, fluidos y aeronáuticos  
eflorez@unipamplona.edu.co

**Director: OSCAR BROWN MANRIQUE**

Doctor en Ingeniería hidráulica  
Oscarbrown@unica.cu

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA, MECATRONICA E  
INDUSTRIAL**

**FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS  
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

Pamplona, febrero 22 del 2016.

## Dedicatoria

*A nuestro padre celestial que me ofreció la vida, para poder culminar mis estudios universitarios.*

*A mi madre JULIA MARLEN ALFONSO ALFONSO por ser la persona que inspira respeto, amor, dedicación, y fortaleza. Gracias por su apoyo incondicional siempre me demostró que el único camino que había era seguir adelante hasta llegar a escribir estas letras de agradecimiento para con ella.*

*A mi padre RITO ANTONIO DAZA BERMUDEZ aquel hombre que un día me dijo que la vida tiene sentido cuando nos proponemos imprimirle dedicación respeto y humildad. Hoy estas palabras las dedico en tu memoria. Gracias por confiar hasta el último día de tu vida en mí. Hoy te cumplo la promesa de ser un ingeniero.*

*A mi hermano DIEGO HUMBERTO DAZA ALFONSO porque en él comprendí que si decides tomar decisiones hay que hacerlo con el corazón. Porque si te propones ser alguien lo serás aun cuando tengas el mundo en contra, gracias hermano por respetar mis comentarios y creer en mi aun cuando yo mismo a veces no creo lograrlo.*

*A mi hermano RITO DARIO DAZA ALFONSO porque aun siendo menor que mi persona asumió toda la responsabilidad de mi familia cuando faltó papa. La vida tiene sentido cuando te encuentras un brother como usted mi chino. Vale la pena seguir avanzando hacia adelante a pesar de las circunstancias de la vida.*

*A mi hermana YALILE DAZA ALFONSO por aprender de ti que la vida se divide en dos cuando tienes unos niños por los cuales salir adelante. No hay otro camino que seguir caminando aun cuando falte todo solo queda seguir andando.*

*A mi hermana MARTHA YANETH DAZA ALFONSO por esa jerarquía de lucha aun cuando la vida se nos vuelva compleja, porque todo lo que tenemos son buenos recuerdos que hacen de nosotros personas diferentes.*

## AGRADECIMIENTOS

*“Acepta la responsabilidad de edificarte a ti mismo el valor de acusarte en el fracaso para volver a empezar corrigiéndote.”*

*Expreso mi más sincero agradecimiento a las personas que nombrare a continuación ya que hicieron parte de mi formación universitaria;*

*Padre celestial por brindarme la oportunidad de creer en mis capacidades para obtener el título de ingeniero mecánico.*

*Al Dr. Elkin Gregorio Flórez Serrano, ingeniero mecánico y director del proyecto, por transmitir sus conocimientos, de una forma incondicional durante mi estadía en la vida universitaria.*

*Al Dr. Oscar Brown Manrique, ingeniero hidráulico y director del proyecto en cuba, agradezco la estadía y su gratitud por la orientación que me brindo para llevar a cabo este proyecto.*

*Al programa de ingeniería mecánica de la universidad de pamplona, por brindarme una formación con calidad ética para afrontar mi futuro profesional.*

*Agradezco a los docentes del programa de ingeniería mecánica por sus invaluable aportes a mi vida académica.*

*Agradezco a todas las personas que hicieron posible la culminación de mis estudios universitarios en especial a mis amigos Dayro Gonzales y Kevin Dominichetti, y a mis compañeros de convivencia John Jairo lozano y Rafael Correa que hicieron más agradable mi estadía en la ciudad de pamplona.*

*A mi claustro universitario por brindarme las condiciones necesarias para poder adquirir mis conocimientos universitarios, que hoy en día me otorgan como ingeniero mecánico.*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCION .....</b>	<b>10</b>
<b>2. JUSTIFICACION.....</b>	<b>11</b>
<b>3. OBJETIVOS.....</b>	<b>12</b>
<b>3.1 Objetivo general.....</b>	<b>12</b>
<b>3.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>12</b>
<b>4. ESTADO actual – INTRODUCCIÓN ENERGIAS RENOVABLES .....</b>	<b>13</b>
<b>4.1.1 Energía solar térmica.....</b>	<b>15</b>
<b>4.1.1.1 Colectores de baja temperatura .....</b>	<b>16</b>
<b>4.1.1.2 Colectores de media temperatura.....</b>	<b>16</b>
<b>4.1.1.3 Colectores de alta temperatura .....</b>	<b>16</b>
<b>4.1.2 Energía solar pasiva .....</b>	<b>16</b>
<b>4.1.3 Energía solar fotovoltaica .....</b>	<b>17</b>
<b>4.1.3.1 Energía solar en Colombia.....</b>	<b>18</b>
<b>4.1.3.2 Energía solar fotovoltaica en Casanare.....</b>	<b>21</b>
<b>4.2 GENERALIDADES SOBRE EL RECURSO HÍDRICO EN EL MUNDO...21</b>	
<b>4.2.1 Recurso Hídrico en Colombia.....</b>	<b>22</b>
<b>4.2.1.1 Aguas subterráneas en Colombia.....</b>	<b>23</b>
<b>4.2.1.2 Recurso Hídrico en Casanare.....</b>	<b>24</b>
<b>4.3 sistema de bombeo fotovoltaico. ....</b>	<b>26</b>
<b>4.3.1 Descripción de un sistema de bombeo fotovoltaico.....</b>	<b>26</b>
<b>4.3.1.1 Sistema de bombeo solar fotovoltaica con almacenamiento de energía hidráulica. ....</b>	<b>26</b>
<b>4.3.1.2 Sistema de bombeo solar fotovoltaica con almacenamiento de energía eléctrica.....</b>	<b>27</b>
<b>4.3.2 Clasificación de los sistemas de bombeo según la potencia. ....</b>	<b>27</b>
<b>4.3.2.1 Sistemas de pequeña potencia (50-400 Wp). ....</b>	<b>28</b>
<b>4.3.2.2 Sistemas de mediana potencia (400-1500 Wp).....</b>	<b>28</b>
<b>4.4 SISTEMA DE BOMBEO.....</b>	<b>29</b>
<b>4.4.1 Tipos y aplicaciones de las bombas. ....</b>	<b>29</b>
<b>4.4.1.1 Bombas Centrífugas.....</b>	<b>30</b>
<b>4.4.1.2 Bombas Reciprocantes.....</b>	<b>31</b>
<b>4.4.2 Curvas características de las bombas. ....</b>	<b>32</b>

<b>5. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>33</b>
<b>5.1 CONDICIONES GENERALES DEL TERRENO DE ESTUDIO.....</b>	<b>33</b>
<b>5.2 RECURSOS DISPONIBLES EN LA ZONA PARA CARACTERIZAR EL SISTEMA DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO.....</b>	<b>34</b>
5.2.1 Disponibilidad del recurso solar.....	34
5.2.2 Estimación de la radiación solar y sus componentes por medio de cálculos matemáticos.....	36
5.2.3 Posición de los módulos fotovoltaicos.....	38
<b>5.3 DETERMINACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO.....</b>	<b>39</b>
5.3.1 Caracterización del sistema de bombeo fotovoltaico.....	39
5.3.1.1 Determinación de necesidades hidráulicas.....	39
5.3.1.2 Determinación de la altura total de bombeo.....	41
5.4 Diseño hidráulico del sistema de bombeo.....	43
5.5 Diseño del sistema fotovoltaico.....	50
5.5.1 Demanda de energía.....	50
5.5.2 Numero de módulos fotovoltaicos.....	51
5.5.3 Corriente de entrada al regulador de carga.....	51
5.5.4 Potencia del inversor.....	51
5.6 Análisis económico.....	52
<b>6. analisis y discusion de resultados.....</b>	<b>53</b>
6.1 Análisis de las variables climatológicas.....	53
6.2 Análisis de la radiación solar.....	53
6.3 Análisis de la demanda de agua.....	55
6.4 Análisis del sistema de bombeo solar fotovoltaico.....	56
6.5 Análisis del diseño hidráulico del sistema de bombeo.....	57
6.6 Análisis del arreglo fotovoltaico.....	59
6.7 Análisis económico.....	61
<b>7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>63</b>
<b>8. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>64</b>
<b>9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>65</b>
<b>10. ANEXOS.....</b>	<b>69</b>
10.1 Anexo 1.....	69
10.2 Anexo 2.....	71

<b>10.3</b>	<b>Anexo 3.....</b>	<b>72</b>
-------------	---------------------	-----------

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Capacidad instalada de las energías renovables en el mundo. ....	13
Tabla 2. Radicación solar en las regiones de Colombia. ....	20
Tabla 3. Principales fuentes Hídricas del municipio de Tauramena. ....	25
Tabla 4. Características de los sistemas de abastecimiento de agua.....	25
Tabla 5. Datos geográficos de la zona. ....	33
Tabla 6. Radiación solar promedio mensual. ....	34
Tabla 7. Brillo solar promedio mensual. ....	35
Tabla 8. Radiación solar promedio mensual (NASA).....	35
Tabla 9. Consumo mínimo diario de agua. ....	40
Tabla 10. Relación diámetro y velocidad. ....	43
Tabla 11. Coeficiente de pérdidas de carga en accesorios (K).....	45
Tabla 12. Presión atmosférica y de vapor en función de la altura.....	46
Tabla 13. Altura máxima de succión. ....	47
Tabla 14. Módulos de elasticidad. ....	49
Tabla 15. Radiación solar sobre una superficie horizontal.....	54
Tabla 16. Radiación solar sobre una superficie inclinada. ....	54
Tabla 17. Volumen de agua disponible según HSP y número de tanques. ....	55
Tabla 18. Selección de la bomba en función de $H_T$ (m) y $D_a$ ( $m^3/día$ ).....	56
Tabla 19. Datos técnicos de las bombas Grundfos. ....	57
Tabla 20. Características eléctricas de las bombas Grundfos.....	57
Tabla 21. Parámetros de la bomba. ....	58
Tabla 22. Parámetros generales de las tuberías. ....	58
Tabla 23. Parámetros de la tubería de succión. ....	58
Tabla 24. Parámetros de la tubería de descarga.....	59
Tabla 25. Parámetros del golpe de ariete. ....	59
Tabla 26. Parámetros fundamentales del sistema fotovoltaico. ....	60
Tabla 27. Datos utilizados para el cálculo económico ....	61
Tabla 28. Ahorro de energía y combustible a partir de la energía producida.	61
Tabla 29. Estimación de los costos de las obras anexas y el costo total.....	62
Tabla 30. Costos del sistema fotovoltaico.....	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipo de colectores. ....	15
Figura 2. Luz pasiva vivienda. ....	16
Figura 3. Arreglo panel fotovoltaico.....	17
Figura 4. Países líderes en producción de células fotovoltaicas. ....	18
Figura 5. Atlas de radiación solar de Colombia. ....	19
Figura 6. Capacidad efectiva de generación de energía eléctrica en Colombia en MW. ....	20
Figura 7. Distribución de las reservas de aguas subterráneas por provincias en Colombia. ....	23
Figura 8. Elementos de un sistema de bombeo fotovoltaico.....	27
Figura 9. Clasificación de Bombas.....	30
Figura 10. Ubicación geográfica.....	33
Figura 11. Alturas que intervienen en un sistema de bombeo. ....	41
Figura 12. Valores promedio de las variables climáticas. ....	53
Figura 13. Características del panel fotovoltaico YB-156M36-150. ....	59
Figura 14. Representación esquemática del cableado en paralelo. ....	60
Figura 15. Componentes del sistema fotovoltaico. ....	60

## 1. INTRODUCCION

El bombeo de agua a pequeña escala es una aplicación de mucha trascendencia en el mundo; tiene especial impacto en comunidades rurales donde no hay suministro de energía eléctrica convencional. Los sistemas de bombeo fotovoltaicos se caracterizan por ser de alta confiabilidad, larga duración y mínimo mantenimiento, lo cual se traduce en un menor costo a largo plazo si se le compara con otras alternativas (Gonzales, 2010).

La extracción de agua de pozos para riego de cultivos es una de las aplicaciones más rentables y novedosa de la energía solar fotovoltaica (ingemecanica, 2006).

El proyecto se enfoca en dimensionar un sistema de bombeo de agua a pequeña escala, alimentado por energía solar fotovoltaica, que permita definir las características físicas y técnicas, requeridas para ser implementado en zonas rurales, partiendo del potencial de energía solar disponible, y así ayudar a suplir las necesidades básicas insatisfechas de estas, tales como: agua para consumo humano, para irrigación de pequeñas parcelas y para abrevaderos de animales.

Además, el sistema de bombeo de agua estará condicionado a las características de la fuente donde ésta se extrae. Es decir si se extrae de un pozo profundo o de la riberas de un río o de aguas superficiales. Por consiguiente, se caracterizará el sistema fotovoltaico, capaz de cubrir la demanda energética del proceso de bombeo utilizado para suplir los requerimientos hidráulicos demandados por la zona. El sistema fotovoltaico se soportará y estará condicionado al potencial solar disponible en la zona ( $\text{kW/m}^2$ ), la longitud, la latitud, y la altitud, etc.

Para definir los elementos que harán parte del sistema de bombeo fotovoltaico, además de tomar como referencia de entrada el potencial solar de la zona, se determinará el caudal de agua demandado y la cabeza de presión requerida.

Para determinar el potencial energético de la zona seleccionada como referencia en el presente proyecto, se utilizaron, entre otros, los mapas solares, donde se representa la distribución espacial del potencial energético en Colombia (IDEAM & UPME, 2005), lo cuales fueron validados con los datos que contiene la página de la nasa "atmospheric science data center", sobre el recurso solar disponible en cualquier parte del mundo (NASA, 2008), y los modelos de Hotter y Solener. A partir de dicha información se realizó la selección de los elementos que componen el sistema solar fotovoltaico.

## 2. JUSTIFICACION

La caracterización de un sistema de bombeo solar fotovoltaico brinda una alternativa de solución a las comunidades rurales, permitiendo realizar labores domésticas y agroindustriales, cuando en la misma no se cuenta con energía eléctrica para tal fin. Es por ello que estos sistemas pueden ayudar a mejorar la calidad de vida de las personas pertenecientes a las zonas rurales.

Por ejemplo, el riego de un cultivo utilizando un sistema de bombeo solar fotovoltaico, aunque requiere de una inversión económica alta, inicialmente, a futuro puede reducir los costos de producción. Es por ello, que se justifica caracterizar estos sistemas para que sean implementados por el usuario en zonas específicas que requieran una adaptación del sistema de acuerdo a las características del lugar.

Una de las ventajas significativas para los sistemas de bombeo solar fotovoltaico comparado con otros sistemas es su bajo impacto ambiental, no causa daño alguno negativamente al entorno, donde se encuentra instalado, tampoco contamina el aire o el agua y no producen ruido. Estos sistemas tienden a ser modulares, de manera que pueden adecuarse para satisfacer necesidades específicas del usuario en cualquier momento (Gonzales, 2010).

Todo indica que a futuro se deben plantear soluciones alternativas amigables con el entorno natural para satisfacer las necesidades energéticas de un país que conlleven a la disminución de problemas convencionales que se generan con el desarrollo de un país.

*“Cada vez somos más dependientes. Hasta ahora lo éramos del agua y de la comida, después de la temperatura, después de la electricidad y ahora, sin tecnología, nos encontramos desprotegidos. No somos conscientes, pero sí somos muy sensibles”, (Sudria.).*

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Caracterizar un sistema de bombeo fotovoltaico para aplicaciones en una zona rural de Colombia.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Estudio y apropiación del estado del arte, tanto en la parte técnica, relacionada con la energía solar, como en los sistemas de bombeo.
- ✓ Definir los parámetros a ser tomados en cuenta para la caracterización del sistema de bombeo fotovoltaico.
- ✓ Especificar las características técnicas del sistema de bombeo.
- ✓ Dimensionar el sistema solar fotovoltaico con sus respectivos componentes de acuerdo a la necesidad hidráulica que se requiere.
- ✓ Socializar los resultados y la utilidad del sistema.

#### 4. ESTADO ACTUAL – INTRODUCCIÓN ENERGÍAS RENOVABLES

El término energías renovables, energías alternativas, energías permanentes o energías blandas, engloba una serie de fuentes energéticas que en teoría no se deben agotar con el paso del tiempo (Arrastia, 2012).

El consumo de energía es uno de los grandes medidores del progreso y desarrollo que tiene una sociedad. El concepto de “crisis energética” aparece cuando las fuentes de energía de las que se abastece la sociedad se agotan en una escala humana limitada. Es así que el modelo económico actual que presenta gran parte del mundo, donde su funcionamiento depende de un continuo crecimiento, exige también una demanda igualmente creciente de energía. Puesto que las fuentes de energía fósil y nuclear son restringidas, es inevitable que en un determinado momento la demanda no pueda ser abastecida y todo el sistema colapse, salvo que se descubran y desarrollen otros nuevos métodos para obtener energía: éstas serían las energías alternativas o energías no convencionales.

Las energías renovables han constituido una parte importante de la energía utilizada por los humanos desde tiempos remotos, especialmente la solar, la eólica y la hidráulica.

Mundialmente la capacidad instalada de las fuentes de energía renovable para 2011, se estimó en 1,360 giga watts (GW), alrededor de 8% más de lo registrado en 2010, lo que la llevó a representar aproximadamente un cuarto de la capacidad global instalada (estimada en alrededor de 5,360 GW en 2011) y alrededor del 20.3% del suministro global de energía eléctrica ver tabla 1 (SENER, 2012).

Tabla 1. Capacidad instalada de las energías renovables en el mundo.

Fuentes / Tecnologías	Capacidad agregada en 2011	Capacidad existente a finales de 2011
<b>Generación de electricidad (GW)</b>		
Eoloeléctricas	40	238
Solar fotovoltaica	30	70
Concentración solar termoeléctrica	0.46	1.76
Hidroeléctricas	25	970
Biomasa	5.9	72
Geotermoeléctrica	0.1	11.1
Energías oceánicas	0.3	0.5
<b>Calentamiento de agua/calentamiento (GWt)</b>		
Calentamiento solar de agua / calentamiento de espacios	>49	232
Biomasa	10	290
Geotermia	7	58
<b>Combustibles líquidos (billones de litros/ año)</b>		
Etanol	-0.4	86.1
Biodiesel	2.9	21.4

Fuente: (SENER E. , 2013).

De acuerdo con el reporte anual de energías renovables REN21, la mitad de esta capacidad se encuentra en países desarrollados, tan solo Europa concentra el 20%. En el sector eléctrico, las energías renovables sumaron casi la mitad de los 208 GW estimados de capacidad adicional en el mundo durante 2011. Las energías eólica y solar fotovoltaica fueron las que más incrementaron su capacidad durante 2011, con 40% y 30% de nueva capacidad, respectivamente, seguidas por la hidroeléctrica con casi 25% (REN21, 2012).

#### **4.1 ENERGÍA SOLAR**

El Sol es la única fuente externa de energía que llega al planeta y, aunque a escala cósmica el sol es finito y no renovable, a escala terrestre es inagotable porque se espera que continúe enviándonos energía durante muchos miles de millones de años más (PEREZ, 2010). El sol es una fuente de energía formidable. Como todas las estrellas, el sol es un gigantesco reactor nuclear (su masa es del orden de 330000 veces la de la Tierra) en el que la masa se convierte en energía radiante continuamente. Está formada por diversos elementos en estado gaseoso, (hidrógeno principalmente). Tiene un diámetro de 1,4 millones de km, en su interior existen elevadas presiones, y temperaturas de varios millones de grados, que hace que en el seno del sol se produzcan, de manera continua, reacciones nucleares mediante las cuales dos átomos de hidrógeno se fusionan (dando lugar a un átomo de helio) liberando una gran cantidad de potencia (del orden de 389,1024 W). Este es el origen de la energía solar.

La emisión de energía desde la superficie del sol se denomina radiación solar; y a la energía emitida, energía radiante. La energía radiante que incide sobre la superficie terrestre por unidad de área (irradiación o insolación), se mide en  $kWh/m^2$  y la potencia radiante que incide sobre la superficie terrestre por unidad de área (irradiación), se mide en  $kW/m^2$  (GOMEZ, 2011). De esta energía, solo una parte llega de manera efectiva a la superficie de la tierra en forma de radiación ya que constituye una superficie de captación casi insignificante, al encontrarse a 150 millones de km. Aun así, la potencia que llega es unas 10.000 veces mayor que la que proporciona todas las fuentes energéticas que el hombre emplea. No obstante, hemos de tener en cuenta algunas dificultades que se nos presentan a la hora de emplear esta energía. En primer lugar, la energía nos llega a la tierra de una manera bastante dispersa, y además presenta oscilaciones. Según las horas del día, las condiciones climatológicas, las coordenadas en que nos encontremos y la estación del año recibiremos cantidades diferentes de radiación solar (CEPYME-ARAGON, 2008).

La cantidad de energía solar recibida por unidad de superficie y por unidad de tiempo (por término medio) sobre una superficie enfrentada al sol (perpendicular a los rayos solares), situada en el límite de la atmósfera, a la distancia media entre la tierra y el sol, es de unos  $1.353 W/m^2$ , cantidad que se conoce como constante

solar. Viene a indicarnos la energía media que llega a la capa más externa de la atmósfera terrestre (CEPYME-ARAGON, 2008).

En la actualidad, el uso de la energía solar está experimentando un crecimiento inminente donde se destaca el mercado europeo como el generador de gran parte de los proyectos relacionados con la industria (España, 2006).

Para transformar la energía solar se utilizan principalmente tres tipos de tecnologías: energía solar térmica, energía solar pasiva y energía solar fotovoltaica.

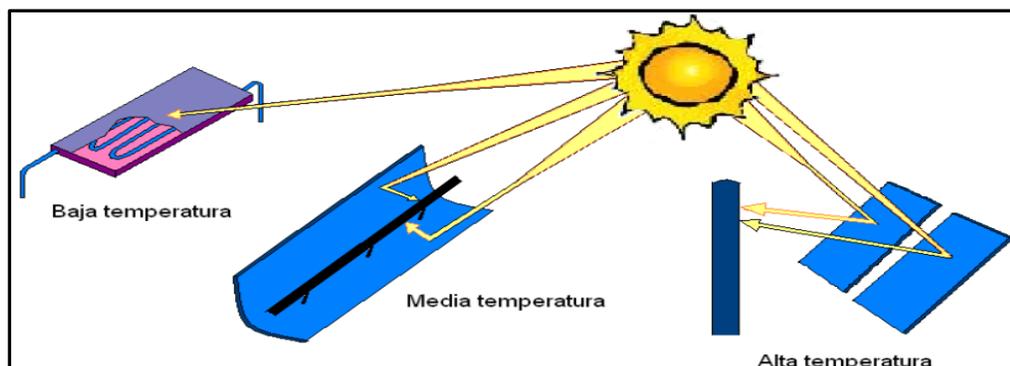
#### 4.1.1 Energía solar térmica

La energía solar térmica radica en la captación de la radiación del sol y su transformación en calor para ejercer un trabajo útil que se utiliza para diferentes aplicaciones. Esta transformación se realiza por medio de unos dispositivos específicamente diseñados denominados colectores solares. El cual es un dispositivo capaz de captar la energía que aporta la radiación solar, utilizándola para calentar un determinado fluido (generalmente agua) a una cierta temperatura. En función de la misma, los colectores pueden ser de alta, media, o baja temperatura, siendo estos últimos, los que han adquirido un mayor desarrollo comercial (CEPYME-ARAGON, 2008).

La aplicación más generalizada de la energía solar térmica es complementar la producción de agua caliente sanitaria, pudiendo llegar a cubrir hasta un 60% de las necesidades de su empresa.

En la actualidad existen tres grandes grupos de colectores solares en función de la temperatura a la que sean capaces de calentar el fluido (ver figura 1): baja (menos de 100°C), media (entre 100 y 400°C), y alta temperatura (más de 400°C).

Figura 1. Tipo de colectores.



Fuente: (CEPYME-ARAGON, 2008).

#### **4.1.1.1 Colectores de baja temperatura**

Estos colectores realizan la captación de forma directa, sin concentración de los rayos solares. Además la temperatura del fluido a calentar está siempre por debajo del punto de ebullición del agua. Según los materiales y técnicas de captación empleadas se pueden distinguir tres tipos de colectores de baja temperatura: colectores de caucho, de placa plana, y de tubos de vacío.

#### **4.1.1.2 Colectores de media temperatura.**

Estos colectores tienen un bajo índice de concentración de los rayos solares, consiguiendo, de este modo, temperaturas más elevadas al aumentar la radiación por unidad de superficie. La temperatura de trabajo se sitúa en un rango de 100°C-400°C. Los más representativos son los colectores cilíndrico – parabólicos.

#### **4.1.1.3 Colectores de alta temperatura**

Estos colectores tienen un alto índice de concentración de la radiación solar, consiguiendo temperaturas de trabajo por encima de 400°C. En la actualidad se utilizan sólo en instalaciones de ensayo y demostración aplicadas a la generación eléctrica, el ensayo de materiales industriales, la desalinización de agua marina por evaporación, etc. Los más representativos son los heliostatos y los discos parabólicos.

### **4.1.2 Energía solar pasiva**

Es aquella que trata de adaptar el edificio a las condiciones climáticas particulares del lugar, logrando mantener las mejores condiciones de confort en el interior del mismo, con el menor apoyo posible de fuentes de energía auxiliar ver figura 2.

**Figura 2. Luz pasiva vivienda.**



Fuente: (CEPYME-ARAGON, 2008).

La arquitectura bioclimática no es algo nuevo, sino que gran parte de la arquitectura tradicional funcionaba según los principios bioclimáticos, cuando las posibilidades de climatización artificial eran escasas y caras.

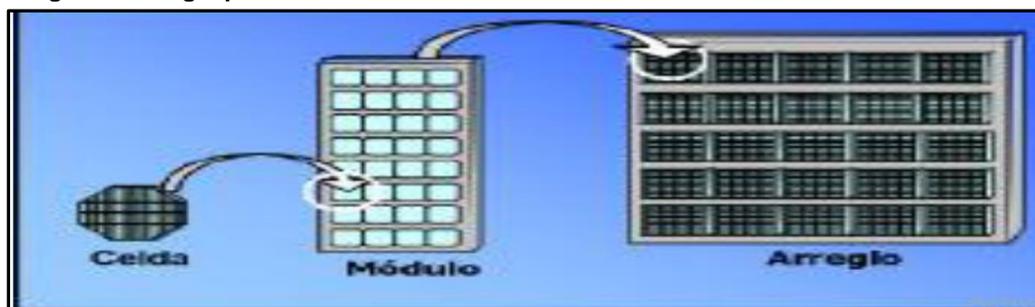
Es importante para un aprovechamiento máximo de las fuentes de energía naturales que haya un planeamiento urbanístico total en el cual se estudien aspectos tales como la situación y distribución de los edificios, las distancias entre ellos y las alturas de construcción para evitar sombras en invierno, las zonas de arbolado necesarias para el aprovechamiento de la radiación solar y la protección del viento, la temperatura, velocidad del viento y la humedad del clima, Esta planificación debe de tener en cuenta así mismo los desplazamientos diarios de las personas, en los distintos medios de transporte, para facilitarlos.

El confort térmico es una sensación que varía de unas personas a otras aunque depende de la temperatura seca, de la humedad, de la velocidad del viento, de la temperatura superficial de los cerramientos y del metabolismo y la vestimenta de las personas. Por tanto en cada punto de la geografía existen casos particulares distintos dependiendo de multitud de factores naturales (CEPYME-ARAGON, 2008).

### 4.1.3 Energía solar fotovoltaica

La conversión fotovoltaica se basa en el efecto fotovoltaico, es decir, en la conversión de la energía lumínica proveniente del sol en energía eléctrica. Es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable (Pearce, 2002), obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica, o bien mediante una deposición de metales sobre un sustrato denominada célula solar de película fina (Work, 2008). Las celdas individuales se ensamblan para formar módulos (40 celdas); si se necesita generar más electricidad los módulos se agrupan para formar lo que se conoce como arreglo (10 módulos) como se muestra en la figura 3.

Figura 3. Arreglo panel fotovoltaico.



Fuente: (UPME-Colombia)

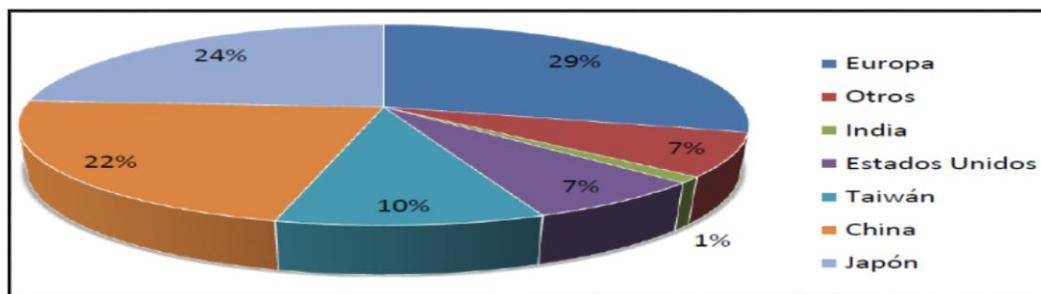
La tecnología fotovoltaica fue desarrollada a finales de los años 50 como parte de los programas espaciales, con la finalidad de desarrollar una fuente de energía económica e inagotable. Gracias al descenso de los costes y a la mejora del rendimiento, los sistemas fotovoltaicos han extendido su utilización a numerosas aplicaciones (CEPYME-ARAGON, 2008).

La tecnología disponible en la actualidad hace que las instalaciones fotovoltaicas tengan un interés y una rentabilidad especiales en aquellos lugares alejados de la red eléctrica, de manera que en muchos casos constituyen la mejor opción en términos económicos, de operatividad y de fiabilidad de suministro.

Entre los años 2001 y 2011 se ha producido un crecimiento exponencial de la producción de energía fotovoltaica, doblándose aproximadamente cada dos años (Roper, 2011). La potencia total fotovoltaica instalada en el mundo (conectada a red) ascendía a 7,6 GW en 2007, 16 GW en 2008, 23 GW en 2009, 40 GW en 2010, 70 GW en 2011, 100 GW en 2012 y 140 GW en 2013 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2009) (Martinot & Janet, 2009) (Whitlock, 2013) (Prabhu, s.f.). A finales de 2014, se habían instalado en todo el mundo cerca de 185 GW de potencia fotovoltaica (Solar industry analysts IHS, 2014).

La energía fotovoltaica instalada en el mundo aumenta a pasos exponenciales debido a la demanda energética del planeta, la cual ayuda a impulsar el desarrollo tecnológico en materia de nuevos sistemas fotovoltaicos que realicen mayores eficiencias en el proceso de conversión de la energía solar a energía eléctrica. Este crecimiento se ha producido gracias a los mecanismos de fomento de algunos países, para solventar sus necesidades energéticas, y ayudar en gran medida a la conservación del planeta. Hoy en día como lo muestra la figura 4 Europa y Japón son las dos potencias líderes en la producción de células fotovoltaicas con un 28.5% y un 24.6% respectivamente seguida por china y otros países como Alemania que le apuntan a desarrollar una tecnología limpia para solventar las demandas energéticas del mundo (Ministerio de ciencia e innovación, 2006).

Figura 4. Países líderes en producción de células fotovoltaicas.



Fuente: (Ernesto & Julio, 2012).

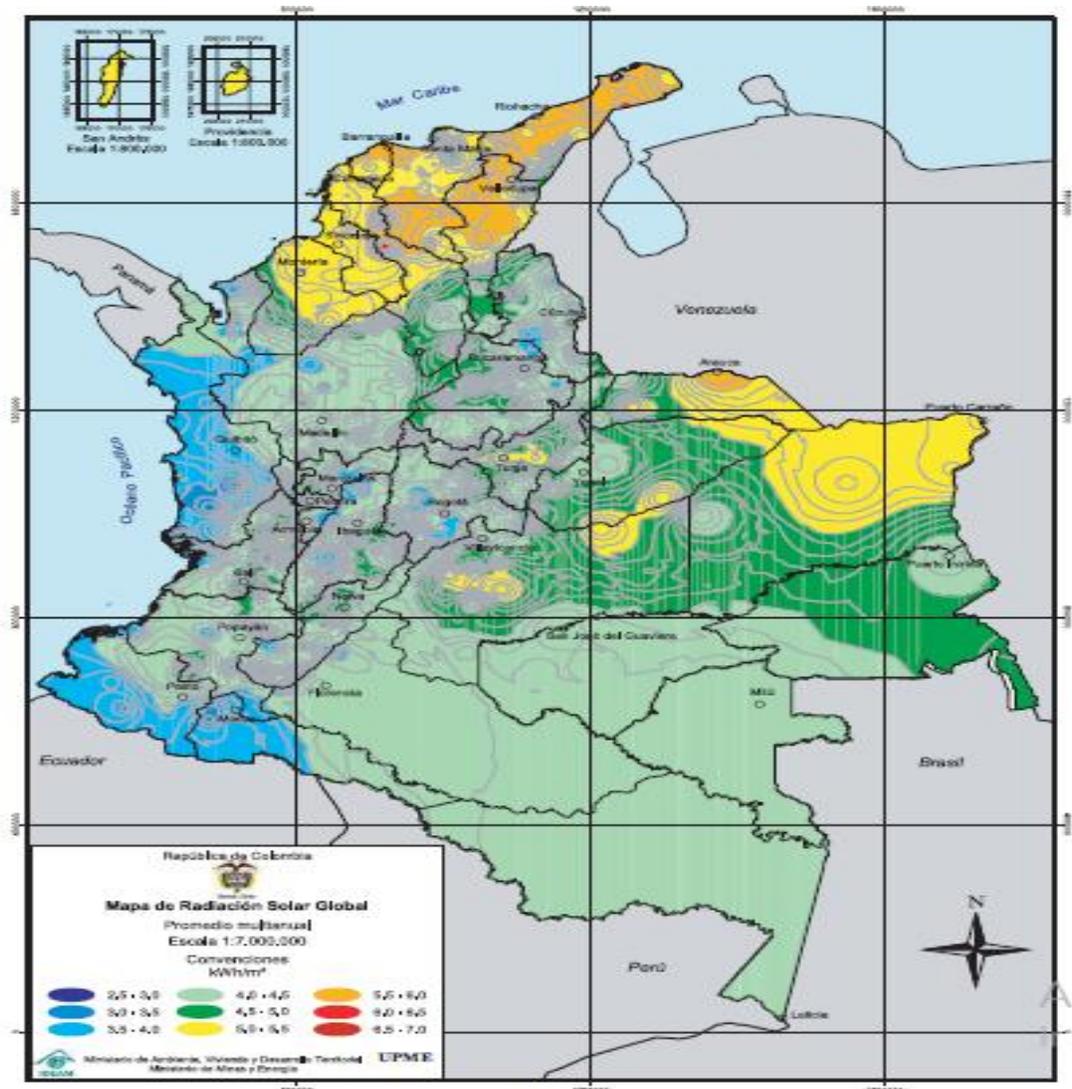
#### 4.1.3.1 Energía solar en Colombia

Colombia está situada en Suramérica cerca de la línea del ecuador, en una posición geográfica ideal para la implementación de la tecnología con energía solar fotovoltaica ya que posee una incidencia de radiación solar notable, donde se estima con un promedio diario multianual de radiación solar de 4,5 kWh/m<sup>2</sup> (Enrique &

Andres, 2011). También es preciso recordar que dentro de la zona tórrida y en la región andina– existen condiciones climáticas variadas y especiales que afectan la disponibilidad del recurso solar, que representa una oportunidad de energía limpia para un desarrollo sostenible (Radiación solar, 2005).

En Colombia se cuenta con el atlas de radiación solar el cual brinda una información cuantificada de la energía solar que incide sobre la superficie del país, donde contiene una aproximación a la distribución espacial del recurso solar, como se observa en la figura 5, estos datos fueron desarrollados con base en la información radiométrica medida directamente en 71 estaciones sobre el territorio nacional, complementada con 383 estaciones meteorológicas donde se realizan medidas rutinarias de brillo solar.

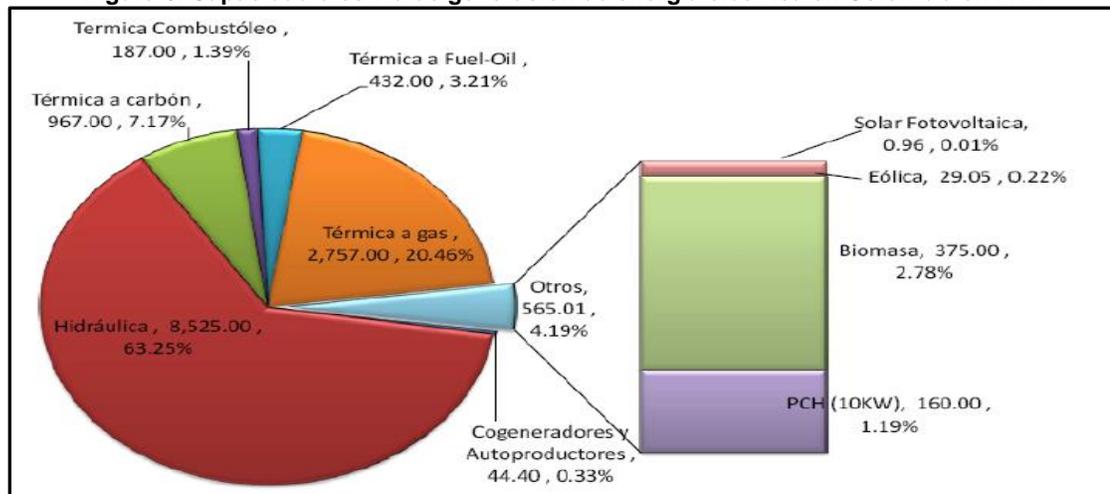
**Figura 5. Atlas de radiación solar de Colombia.**



Fuente: (IDEAM & UPME, 2005).

En la figura 6 se puede observar que la generación de energía fotovoltaica para el año 2009 no superaba los 0.01% de la energía total generada por el territorio nacional, debido a que Colombia cuenta con buenas condiciones hídricas en toda su geografía nacional, conforme se desarrolle el país se tendrán que implementar nuevas fuentes de generación de energía limpias y amigables con el medio ambiente, es por ello que las energía solar fotovoltaica ira desarrollándose a pasos exponenciales para poder ser implementada en los países en vía de desarrollo.

**Figura 6. Capacidad efectiva de generación de energía eléctrica en Colombia en MW.**



Fuente: (Forero, 2009).

Una aproximación a la disponibilidad promedio multianual de energía solar por regiones se describe en la tabla 2 de acuerdo a los datos disponibles por el Sistema de información de eficiencia energética y energías alternativa (SIMEC).

**Tabla 2. Radicación solar en las regiones de Colombia.**

REGIÓN	KWh/m <sup>2</sup> /año
GUAJIRA	2.190
COSTA ATLANTICA	1.825
ORINOQUIA	1.643
AMAZONIA	1.551
ANDINA	1.643
COSTA PACÍFICA	1.278

Fuente: (IDEAM & UPME, 2005).

#### **4.1.3.2 Energía solar fotovoltaica en Casanare.**

El conocimiento de la disponibilidad de la energía solar es indispensable, porque permite conocer cuál es la capacidad solar que se encuentra en el lugar de estudio para transformar toda esta energía solar en energía eléctrica y así conocer qué nivel de energía demandada se podrá suplir o generar por medio del sistema fotovoltaico.

Las condiciones geofísicas de Casanare y del municipio de Tauramena, donde se realizara la caracterización del sistema de bombeo solar fotovoltaico, permiten que las instalaciones de energía fotovoltaica (EFV) puedan brindar una alternativa tecnológica innovadora para suplir necesidades que pertenecen a las labores agroindustriales de estas zonas rurales de la región.

Se puede establecer también que la radiación solar incidente en el departamento de Casanare, perteneciente a la región de la Orinoquia, oscila en un promedio de 1.643 kW/m<sup>2</sup>/año, como se documentó en la tabla 2.

Los recursos que se han destinado para la implementación de energía fotovoltaica (EFV), de Casanare, provienen del Fondo Nacional de Regalías, con una participación de recursos del municipio; el caso de la dotación de energía fotovoltaica a 40 escuelas y 2.000 viviendas rurales en el Departamento de Casanare alcanzó un valor de \$7.680.080, proveniente del Fondo Nacional de Regalías y un aporte del Departamento de \$251.231.000 (Peralta, 2011).

En el municipio de Tauramena con respecto a lo anteriormente mencionado se desarrolló una investigación en la vereda Carúpano, donde el objeto de estudio consistía en desarrollar un proyecto de energía solar fotovoltaica para la escuela y algunas viviendas rurales de esta zona del municipio de Tauramena. Es así que la gobernación de Casanare se propuso dotar de energía fotovoltaica a 40 escuelas rurales del Departamento de Casanare y 2000 viviendas rurales alejadas del sistema de interconexión de la red nacional de electricidad (Peralta, 2011).

Siendo el departamento de Casanare un territorio que cuenta con un alto número de hatos, donde conviven grandes cantidades de animales, los cuales demandan un gran volumen de agua para su supervivencia, se requiere la implementación de sistemas de extracción de agua a partir de nuevas fuentes de energía, como lo es la energía solar fotovoltaica, que permitan en épocas de sequía mantener las condiciones normales de suministro del preciado líquido.

#### **4.2 GENERALIDADES SOBRE EL RECURSO HÍDRICO EN EL MUNDO.**

En el mundo existen 1380 millones de km<sup>3</sup> de agua en los estados líquido, sólido y gaseoso, de los cuales el 97,2% del total corresponde a los mares y océanos, el 2,15% se encuentra en forma de hielo en los glaciales y solamente el 0,65% está

disponible para su utilización por las personas, las plantas y el ambiente; no obstante, cerca de 450 millones de personas en veinte países están con carencia de agua (Science and Vie, 2000; Shiklomanov y Rodda, 2003; Salvador et al., 2005). Los proyectos de riego en el mundo usan 3 500 km<sup>3</sup> de agua al año, del cual el 74% se evapora por los cultivos, lo que representa aproximadamente el 80% de todo el uso humano de agua que se estima en 4400 km<sup>3</sup> por año. El agua utilizada en el riego constituye el 25% de los recursos totales disponibles de agua que es de 14 000 km<sup>3</sup> y el 9% de todas las descargas anuales de los ríos en el ciclo hidrológico que asciende a 40 000 km<sup>3</sup> (UNESCO, 2003).

La agricultura es el mayor consumidor de agua en el mundo; sin embargo, es el mayor contaminante de este importante líquido (UNESCO, 2003). Esta actividad utiliza casi el 70% del agua de los ríos, los lagos y los acuíferos; por tanto, es potencialmente el de mayores pérdidas las cuales ocurren por evaporación, por absorción y por fugas. Se calcula que sólo llega a la zona de cultivos entre el 15 y el 50 % del agua que se extrae para riego (OPS/CEPIS, 2002).

El agua puede ser abundante en algunas localidades y escasear en otras; aunque se considera un recurso renovable por el ciclo de las precipitaciones, también puede ser finita o no renovable, si no se toman las medidas apropiadas para su protección (Pimentel, 2004).

#### **4.2.1 Recurso Hídrico en Colombia.**

La ubicación geográfica, la variada topografía y el régimen climático que caracterizan el territorio colombiano han determinado que éste posea una de las mayores ofertas hídricas del planeta; sin embargo, esta oferta no está distribuida homogéneamente en todo el territorio, y está sometida a fuertes variaciones que determinan la disponibilidad en el recurso hídrico.

La riqueza hídrica del país se manifiesta en su extensa red fluvial superficial que cubre al país en unas condiciones favorables de almacenamiento de aguas subterráneas.

Según el IDEAM (2008), a finales del siglo XX Colombia ocupaba el cuarto lugar en el mundo por disponibilidad per cápita de agua, mientras que de acuerdo con el informe de la ONU sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo “agua para todos-agua para la vida”, Colombia ocupa el puesto 24 entre 203 países; este lugar aún hace figurar a Colombia como potencia hídrica mundial, muy a pesar de los problemas actuales relacionados con el desabastecimiento de agua y la afectación de fuentes hídricas naturales. Esta situación se refleja en las siguientes cifras:

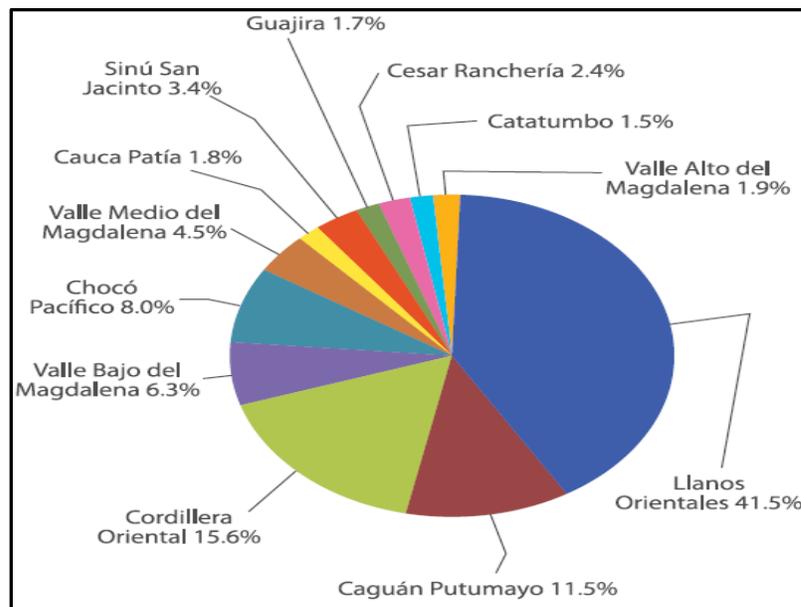
- ✓ Colombia cuenta con al menos 737.000 cuerpos de agua entre ríos, quebradas, caños y lagunas (HIMAT, 1994).

- ✓ En el territorio colombiano en promedio cada año caen 3.400 km<sup>3</sup> de agua, se evaporan 1.100 km<sup>3</sup> y escurren 2.300 km<sup>3</sup>; si se supone que un país es capaz de retener en sus dispositivos de abastecimiento el 40% de esta oferta, en efectivo Colombia contaría con 1.150 km<sup>3</sup>/año de la oferta hídrica total superficial.
- ✓ La capacidad de los sistemas de abastecimiento y suministro de agua en nuestro país aún no alcanzan ese porcentaje con respecto a la oferta de agua.
- ✓ La oferta de agua más frecuente (oferta modal) para el territorio colombiano alcanza la cifra de 1.910 km<sup>3</sup>/año, mientras que en eventos extremos (oferta en año seco) no supera los 1.240 km<sup>3</sup>/año.

#### 4.2.1.1 Aguas subterráneas en Colombia.

Según el IDEAM (ENA, 2000), los estudios hidrogeológicos en el país no abarcan más del 15% de todas las áreas con potencial de explotación de aguas subterráneas (414.375 km<sup>2</sup>), con unas reservas estimadas en 140.879 km<sup>3</sup>, equivalente a 70 veces el total de las aguas superficiales del país. La distribución de las reservas por provincias en Colombia, se presenta en la Figura 7.

Figura 7. Distribución de las reservas de aguas subterráneas por provincias en Colombia.



Fuente: (IDEAM, Estudio Nacional del Agua, 2010).

El mismo estudio, menciona que en Colombia se extrae agua subterránea de depósitos recientes y unidades sedimentarias terciarias y cretácicas mediante pozos, con profundidades que varían entre 50 y 300 m; sin embargo, esta información es aproximada, pues en la actualidad no existe un inventario total integrado ni un monitoreo del seguimiento de las captaciones subterráneas.

El Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas), ha elaborado el Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia (en proceso de oficialización), las cuales abarcan el 39% del territorio colombiano. La potencialidad de los acuíferos se clasifica según su productividad, clasificándose como acuíferos de productividad muy alta los que tienen caudales  $\geq 50$  l/s (Valle del Río Cauca, Valle del Río Cesar, La Luna) y de productividad muy baja los acuíferos que tienen caudales  $\leq 10$  l/s (Sabana), (Cisneros & Tundasi, 2012).

#### **4.2.1.2 Recurso Hídrico en Casanare.**

La Contraloría Departamental de Casanare, en cumplimiento de lo establecido en el artículo 272 de la Constitución Política de Colombia, el numeral 7º del artículo 9º de la Ley 330 de 1996 y el plan estratégico corporativo (PEC) 2012- 2015, presenta el informe sobre el Estado de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente del Departamento de Casanare, vigencia 2012. En el cual se realizó un estudio exhaustivo sobre el recurso hídrico de cada municipio perteneciente al departamento de Casanare.

Por la distribución y cantidad de las fuentes loticas y lenticas (ríos, quebradas, caños, esteros, lagunas y madres viejas), sobre el departamento de Casanare, se considera una provincia de gran riqueza y potencial hídrico. Las principales fuentes loticas o cuerpos de agua con corrientes permanentes y dinámicas que se ubican en las subcuencas de todo su territorio tanto rural como urbano. A continuación se describirá el recurso hídrico del municipio de Tauramena donde se caracterizara el sistema de bombeo fotovoltaico para distintas aplicaciones de las zonas rurales del municipio.

##### **4.2.1.2.1 Recurso hídrico en Tauramena.**

El Municipio de Tauramena cuenta con un gran potencial hídrico, tiene cuatro subcuencas, nueve microcuencas y numerosos drenajes directos que aportan sus aguas a la cuenca del Río Meta. El río Meta es la arteria fluvial más importante del Departamento de Casanare, recorre el extremo sur del Municipio de Tauramena en una longitud de 57 Km, recibiendo el aporte de importantes drenajes como los Ríos Túa, Güira y Caño El Boral.

Las principales fuentes hídricas del municipio de Tauramena se describen en la tabla 3, donde se tiene una estadística de la longitud del cauce principal de cada afluente o rio perteneciente a este municipio.

Tabla 3. Principales fuentes Hídricas del municipio de Tauramena.

Nombre	Longitud cauce principal (Km)
Río Túa	140.1
Caño el Boral	64.0
Caño Iquía	26.0
Río Chitamena	56.0
Caño Montegordo	38.1
Caño Orocuecito	49.0
Caño Güira	127.4
Río Caja	32.0
Río Cusiana	160.0
Caño Madroños	25.4

Fuente: CORPORINOQUIA. (Agenda ambiental municipal)

En la tabla 4, se describen las veredas aledañas a la zona urbana del municipio de Tauramena, que cuentan con sistemas de almacenamiento de agua, así como las respectivas características de dichos sistemas.

Tabla 4. Características de los sistemas de abastecimiento de agua.

Vereda o sector	Sistema	Fuente	Caudal captado (lps)	Cobertura
Casco urbano	Acueducto	Río Chitamena- Qda la Tauramenera y pozo profundo	50	100%
Aguablanc a	Bombeo a tanque	Pozo profundo	1	60%
Raizal		Pozo profundo	0.11	100%
Yaguaros	Bombeo y por gravedad	Pozo profundo	1.8	100%
Aguamaco	Acueducto veredal	Río Chitamena	2.4	100%
Paso Cusiana	Bombeo	Pozo profundo	5	
Iquia		Pozo profundo	2	
Guafal	Por gravedad	Quebrada Guafalera	0.3	100%
Bendiciones	Por gravedad	Varias fuentes	0.3	100%
Jaguito	Distrito de riego	Qda. La Portana	5	100%
Cabañas	Acueducto	Qda. La Limonera		100%
Visinaca	Por gravedad	Qda. Visinaca	1	Escuela
Corocito	Bombeo y por gravedad	Pozo profundo	1.5	
Zambo	Por gravedad		0.5	1 usuario
Piñalito	Por bombeo	Pozo profundo	1	15 usuarios
El palmar	Por gravedad	Nacederos N.N	1	9 usuarios
Chaparral		Pozo profundo		26 usuarios
El Oso	Captación superficial	Qda. La Lapa		
Güichire		Pozo profundo	0.2	11 usuarios
Delicias	Gravedad y por bombeo			30 usuarios
Chitamena	Bombeo y por gravedad	Pozo profundo	3.1	

Fuente: (Agenda ambiental municipal, 2013).

### **4.3 SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO.**

Siendo el Sol el origen de las demás formas de energía que el hombre ha utilizado desde los comienzos de la historia; no sería racional no intentar aprovechar esta fuente energética gratuita, limpia e inagotable, que puede ayudar a evitar la dependencia del petróleo o de otras fuentes alternativas poco seguras, contaminantes o simplemente agotables (Yilman, 2007).

La energía solar viene siendo utilizada para el bombeo de agua desde la segunda mitad del siglo XX; sin embargo, las condiciones tecnológicas necesarias para el bombeo fotovoltaico surgen mucho más tarde (Poza, 2008).

El efecto fotovoltaico lo observó por primera vez el físico francés Edmund Becquerel en el año 1839 (Lorenzo, 1994); sin embargo, las primeras aplicaciones comerciales de los sistemas fotovoltaicos para el bombeo fueron en el año de 1997; pero no se sabe con exactitud cuando esta tecnología comenzó a ser utilizada para el riego (Poza, 2007).

En el pasado el sistema de bombeo solar fotovoltaico solo era usado en áreas con abundante insolación; sin embargo, en la actualidad pueden ser aplicados en lugares con insolación relativamente pequeña, como por ejemplo en países de Europa del Norte y del Este, como Croacia y Filadelfia (Ecofys Energy and Environment, 2001).

Los sistemas de bombes pueden clasificarse en: bombeo manual; bombeo de combustión interna; bombeo que utiliza red eléctrica convencional y bombeo que utiliza energías renovables como: la hidráulica, eólica, de la biomasa y la solar fotovoltaica. Alonso (2005) señala que el bombeo solar fotovoltaico presenta numerosas ventajas entre las que se encuentran las siguientes: son muy sencillos en su operación, tiene un bajo impacto ambiental al no contaminar el aire o el agua, no produce ruidos y son modulares lo que permite su adecuación para satisfacer las necesidades específicas del usuario en cualquier momento.

#### **4.3.1 Descripción de un sistema de bombeo fotovoltaico.**

En la figura 8 se muestran los dos tipos de bombeo más habituales en la industria de los sistemas de bombeo solar fotovoltaica.

##### **4.3.1.1 Sistema de bombeo solar fotovoltaica con almacenamiento de energía hidráulica.**

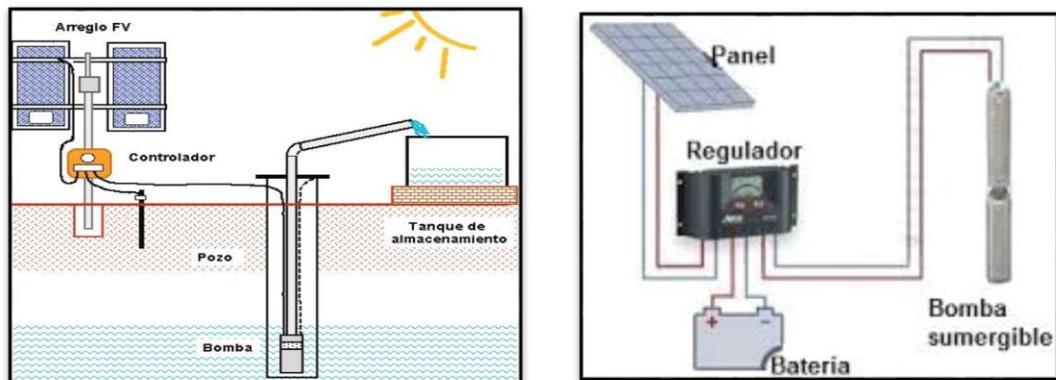
Estos sistemas cuentan con un generador que son los módulos fotovoltaicos, un sistema motor/bomba un inversor DC/AC, un sistema de tuberías y un sistema de acumulación de agua, el cual permite almacenar energía hidráulica en un tanque o

deposito elevado (como se observa en la imagen izquierda de la figura 8) El sistema de acumulación suele ser un depósito de un volumen adecuado para proporcionar la autonomía necesaria, en general de 2 o 3 días para sistemas de agua potable requeridas por el consumidor.

#### 4.3.1.2 Sistema de bombeo solar fotovoltaica con almacenamiento de energía eléctrica.

Estos sistemas cuentan con un generador que son los módulos fotovoltaicos, un sistema motor/bomba un inversor DC/AC, un sistema de tuberías y un banco de baterías para almacenar energía eléctrica (como se observa en la imagen derecha de la figura 8) para proporcionar la autonomía del sistema se acumula energía eléctrica en baterías permitiendo que el sistemas de bombeo funcione las 24 horas del día, inclusive en las horas de la noche cuando no se cuenta con la radiación solar, permitiendo así suministrar agua potable en cualquier instante de tiempo que requiera el consumidor.

Figura 8. Elementos de un sistema de bombeo fotovoltaico.



Fuente: (Abella, 2005).

Para los dos tipos de bombeo descritos anteriormente, el sistema de acondicionamiento de potencia o controlador de bombeo está formado por; el inversor, que permite transformar la corriente directa (CD) a corriente alterna (CA), el controlador en si del motor, que adaptan las características de la energía producida por el generador fotovoltaico a las requeridas por el motor. Y a pesar de que se instalan bombas de superficie y flotantes, la configuración más habitual, es una motobomba sumergible instalada en un pozo de sondeo, como se observó en las dos configuraciones de la figura 8 (Abella, 2005).

#### 4.3.2 Clasificación de los sistemas de bombeo según la potencia.

La potencia suministrada por el generador fotovoltaico depende de la radiación solar incidente disponible. Esta varía para cada lugar y para cada día del año, consecuencia del cambio de estación y de las condiciones climáticas y geográficas

específicas. Para proceder al dimensionado de un sistema fotovoltaico se necesitan datos medios mensuales de radiación solar del lugar donde se desee realizar la instalación (Borras, 2010).

La cantidad de energía solar incidente sobre una superficie depende de su orientación relativa al Norte o al Sur y del ángulo que forma con los rayos del sol; por tanto, es necesario determinar la orientación y el ángulo de inclinación que optimicen la relación entre la energía incidente y la energía hidráulica demandada a lo largo de todo el año. Para ello es necesario estimar la radiación global incidente sobre una superficie a distintos ángulos de inclinación a partir de los datos de radiación global sobre superficie horizontal (Lara, 2007) (Prado, 2008).

El mes de dimensionamiento y el ángulo óptimo de inclinación del generador fotovoltaico se seleccionan a partir de que el cociente entre la energía hidráulica y la energía solar sea máximo. Es por tanto, el mes más desfavorable energéticamente para satisfacer la demanda de agua.

Los dispositivos que conforman el sistema de bombeo solar fotovoltaico se han de diseñar y caracterizar para que cumplan con una operación confiable, donde estos elementos actúen conjuntamente acoplados entre ellos para un excelente rendimiento.

A continuación se describe la clasificación de estos sistemas según su potencia.

#### **4.3.2.1 Sistemas de pequeña potencia (50-400 Wp).**

Utilizan principalmente un motor DC accionando una bomba centrífuga o de desplazamiento positivo. Entre el generador FV y el motor se instala un convertidor DC/DC para mejorar su acoplo. En general son aplicaciones en el rango de los 150 m<sup>3</sup>/día.

Los componentes fundamentales de estos sistemas son:

- Generador Fotovoltaico.
- Convertidor DC/DC (opcional).
- Motor DC.
- Bomba.
- Depósito de almacenamiento (opcional).

#### **4.3.2.2 Sistemas de mediana potencia (400-1500 Wp).**

Compuestos básicamente por una bomba centrífuga sumergible multi-estado accionada por un motor AC de inducción y un inversor AC/DC de frecuencia variable y con SPMP.

Son sistemas caracterizados por su elevada fiabilidad y amplia utilización desde las primeras instalaciones de bombeo FV. Su ciclo hidráulico está en el rango de 150 a 1.500 m<sup>3</sup>/día (Gonzales, Prototipo de sistemas fotovoltaicos para proyectos de cooperación al desarrollo con tecnologías apropiadas, 2010).

Los componentes fundamentales de estos sistemas son:

- Generador Fotovoltaico.
- Convertidor DC/DC (opcional).
- Motor DC.
- Bomba.
- Depósito de almacenamiento (opcional).

#### **4.4 SISTEMA DE BOMBEO.**

Una necesidad muy antigua presentada al ser humano, fue la necesidad de transportar el agua de un lugar a otro, por lo que empezó a idear diversos mecanismos para su solución, iniciando así el desarrollo tecnológico en sistemas de bombeo.

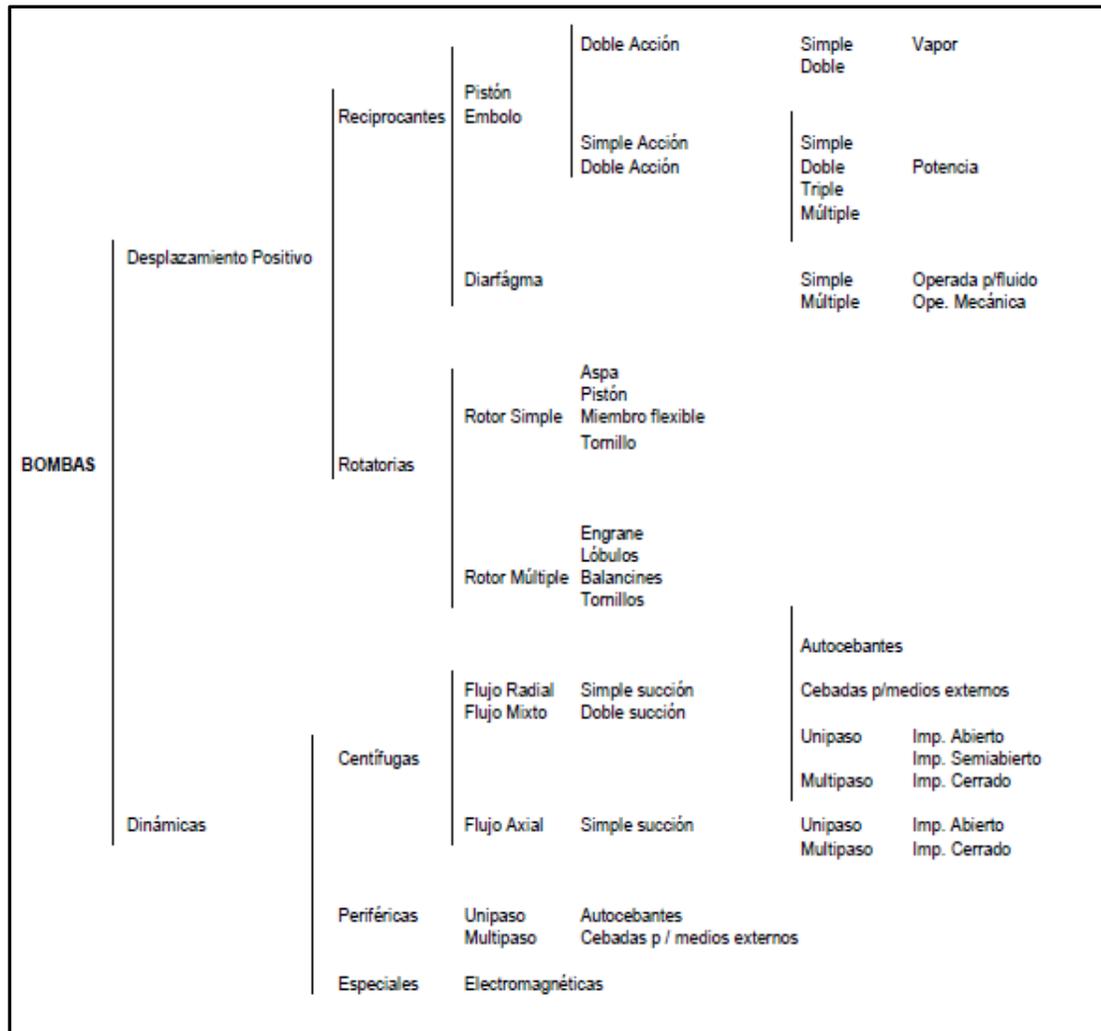
Una bomba sirve para producir una ganancia en carga estática de un fluido procedente de una energía mecánica que se transmite en su eje por medio de un motor.

Hay una diversidad de mecanismos de bombeo (bombas), cuya capacidad, diseño y aplicación cubren un amplio rango que va desde pequeñas unidades utilizadas para dosificación de cantidades mínimas, hasta bombas centrifugas que son capaces de manejar grandes volúmenes para surtir de agua a las grandes concentraciones urbanas. Su variedad de diseños cubren desde diferentes principios de operación, hasta bombas especiales para manejo de sustancias tan diversas como el agua, metales fundidos, concreto, etc.

##### **4.4.1 Tipos y aplicaciones de las bombas.**

Debido a la diversidad de bombas ya mencionadas, hay muchas formas de clasificar las bombas. Por rangos de volúmenes a manejar, por fluidos a mover, etc. Sin embargo, la clasificación más general es en función de la forma en que las bombas imprimen el movimiento al fluido, separándose en dos tipos principales como se observa en la figura 9.

Figura 9. Clasificación de Bombas.



Fuente: (Roberth, 1997).

La clasificación anterior, nos permite apreciar la gran diversidad de tipos que existen y si a ello agregamos materiales de construcción, tamaños diferentes para manejo de gastos y presiones sumamente variables y los diferentes líquidos a manejar, etc., entenderemos la importancia de este tipo de maquinaria.

Dentro de ésta clasificación los tipos de bombas más comúnmente utilizadas son las llamadas Centrífugas, Rotatorias y Reciprocantes, las cuales se describen a continuación:

#### 4.4.1.1 Bombas Centrífugas.

Si tenemos un cubo lleno de agua atado al extremo de una cuerda, y lo ponemos a girar, el agua contenida en el cubo permanecerá ahí, pegándose al extremo del

cubo con una fuerza originada por la velocidad rotacional. Esa es la fuerza centrífuga, y es la base del principio de operación de las bombas centrífugas.

Imaginando un impulsor en reposo dentro del agua. Si dicho impulsor se pone a girar, el agua saldrá impulsada por entre los álabes del mismo. A medida que el agua es arrojada fuera de los álabes, más agua llega al centro del impulsor, por ser ésta la zona de menor presión; por ello es ahí donde generalmente se coloca la solución.

Al continuar girando el impulsor, más agua es expulsada y más agua llega al centro del impulsor, manteniéndose así un flujo continuo, sin variaciones de presión; estas son las características principales de las bombas centrífugas. Si el impulsor se coloca dentro de un envolvente o carcasa, el flujo es dirigido hacia donde es requerido, para lograr de ésta manera el objetivo deseado.

Algunas de las características de estas bombas son las siguientes:

- Descarga de flujo continuo, sin pulsaciones.
- Puede bombear todo tipo de líquidos, sucios abrasivos, con sólidos, etc.
- Altura de succión máxima del orden de 4.5 metros de columna de agua.
- Rangos de presión de descarga hasta de 150 kg/cm<sup>2</sup>.
- Rangos de volúmenes a manejar hasta de 20,000 m<sup>3</sup>/h.

Existen curvas características, típicas, de bombas centrífugas, donde se puede interrelacionar la presión de descarga (carga), capacidad, potencia requerida y eficiencia de operación de la bomba.

#### **4.4.1.2 Bombas Reciprocantes.**

Como su nombre lo indica, producen el bombeo de fluidos con base a un movimiento recíprocante de uno o varios pistones, siendo por ello también bombas de desplazamiento positivo.

La bomba recíprocante tiene la particularidad de producir un flujo pulsante en función del movimiento de su(s) pistón(es). Su capacidad máxima de succión recomendada es de 0.65 atmósferas (6.5 metros de columna de agua) (aunque teóricamente pueden succionar a 1 atmósfera), y pueden construirse para trabajar a presiones hasta de 1,000 kg/cm<sup>2</sup>.

Por sus características, su aplicación es amplia donde se requieren altas presiones, o volúmenes controlados de fluido, por lo que se usan mucho en líquidos de alta viscosidad y en el campo de medición y dosificación. Las bombas recíprocantes no hacen succión en los fluidos a manejarse. Al avanzar el pistón se hace una reducción de presión en la cámara de succión, requiriéndose de una fuerza externa (generalmente la presión atmosférica) que empuja el fluido a la cámara.

La capacidad o flujo a manejarse por la bomba está en función de la velocidad, y existe una interrelación entre la temperatura y la viscosidad del fluido, que afectan también la capacidad en el manejo del fluido.

#### **4.4.2 Curvas características de las bombas.**

La variación de la “Carga” con respecto a la “Capacidad”, a la velocidad constante, representa la “Característica de una Bomba”. Un juego completo de características de bombas, también incluye eficiencia y curvas de potencia requerida (BHP). Las variables que intervienen en el comportamiento de la curva característica de una bomba se describen a continuación.

Capacidad: Se refiere al volumen del fluido bombeado por unidad de tiempo. También llamado “gasto”, y se expresa en litros por minuto, metros cúbicos por minuto, galones por minuto, o unidades equivalentes.

Presión de Descarga, Presión de Succión y Carga Total: En un sistema típico de bombeo, se involucran tres términos diferentes de presión, que deben identificarse claramente, estos son: Presión de descarga, Presión de succión y Presión o Carga Total.

NPSH (Carga Neta Positiva de Succión): NPSH (iniciales para Net Positive Succión Head), en español conocida como la carga neta positiva de succión, se define como la lectura de presión, medida en pies o metros de columna de líquido, tomada de la boquilla de succión, referida a la línea de centro de la bomba, menos la presión de vapor del líquido correspondiente a la temperatura del líquido, más la carga de velocidad en el mismo punto. Es la carga estática que recibe la bomba en la succión menos las pérdidas en la propia tubería de succión.

## 5. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

En este capítulo se explican las relaciones sistemáticas que se establecieron entre las metodologías, técnicas y procedimientos empleados en la investigación. Considerándose las condiciones del área de estudio, se realizó los diferentes cálculos y se tomaron consideraciones a partir de datos estadísticos históricos de la zona de estudio para determinar la caracterización del sistema de bombeo solar fotovoltaico.

### 5.1 CONDICIONES GENERALES DEL TERRENO DE ESTUDIO.

La caracterización del sistema de bombeo solar fotovoltaico está determinado en función de la zona geográfica donde se encuentra ubicado el departamento de Casanare. Y más estrictamente el municipio de Tauramena vereda agua blanca zona rural del municipio. Los datos de geografía y su climatología se encuentran referenciados en la tabla 5 con una población para el municipio de Tauramena según censo del año 2005, de 10,197 habitantes en la cabecera y 5,699 en lo rural. El sistema de bombeo solar fotovoltaico estará caracterizado dentro de los sistemas de pequeña escala, el cual cubre la demanda de agua para una población de 24 personas en la vereda agua blanca del municipio de Tauramena.

Tabla 5. Datos geográficos de la zona.

TAURAMENA CASANARE DATOS GEOGRAFICOS	
Altitud	460 m.s.n.m.
Coordenadas	5°01'07" N---72°45'20" O
Superficie	247.294 Ha
Clima	Cálido---Húmedo
Temperatura	26°C

Fuente: (RODRIGUEZ, 2012)

Tauramena es un municipio que se encuentra al sur del departamento de Casanare y la zona de estudio se encuentra a 2 km del casco urbano del municipio como se describe en la figura 10.

Figura 10. Ubicación geográfica.



Fuente:(Google Maps).

## 5.2 RECURSOS DISPONIBLES EN LA ZONA PARA CARACTERIZAR EL SISTEMA DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO.

La recolección de información sobre la zona donde se caracteriza el sistema es poco útil ya que no se han hecho estudios ni existen registros que documenten información acerca de la radiación solar existente y del recurso hídrico disponible. Para poder definir la caracterización del sistema se escoge información general del departamento de Casanare y de las diferentes entidades que tienen datos estadísticos referentes a los recursos disponibles presentes en esta región del territorio Colombiano.

### 5.2.1 Disponibilidad del recurso solar.

Para esta fase se buscó determinar el potencial energético solar del municipio de Tauramena, se realizó una serie de adquisición de datos por medio de diferentes fuentes de información para establecer una comparación visual y verificar la investigación sobre la disponibilidad del recurso solar. Una de las fuentes tomadas es el atlas de radiación solar de Colombia (IDEAM & UPME, 2005) (Figura. 5), en el cual se muestran mapas de radiación solar (ver tabla 6) y brillo solar (ver tabla 7) donde se obtiene una radiación promedio mensual del año, la radiación se da en kWh/m<sup>2</sup>. Estos datos se comparan con los datos que contiene la página de la nasa atmospheric science data center, (Tabla 8) sobre radiación solar en cualquier lugar del mundo (NASA, s.f.).

Tabla 6. Radiación solar promedio mensual.

RADIACIÓN SOLAR GLOBAL	
PROMEDIO DEL MES	KWH/M <sup>2</sup>
<b>Enero</b>	5.0 - 5.5
<b>Febrero</b>	5.0 - 5.5
<b>Marzo</b>	5.0 - 5.5
<b>Abril</b>	5.0 - 5.5
<b>Mayo</b>	5.0 - 5.5
<b>Junio</b>	5.0 - 5.5
<b>Julio</b>	5.5 - 6.0
<b>Agosto</b>	5.0 - 5.5
<b>Septiembre</b>	5.5 - 6.0
<b>Octubre</b>	5.0 - 5.5
<b>Noviembre</b>	4.0 - 4.5
<b>Diciembre</b>	4.0 - 4.5
<b>Promedio radiación solar global anual</b>	<b>5.0 - 5.5</b>

Fuente: (IDEAM & UPME, sistema de información minero energético Colombiano (SIMEC), 2005).

Tabla 7. Brillo solar promedio mensual.

<b>BRILLO SOLAR GLOBAL</b>	
<b>PROMEDIO DEL MES</b>	<b>HORAS DE SOL AL DIA H</b>
<b>Enero</b>	6 – 7
<b>Febrero</b>	6 – 7
<b>Marzo</b>	4 – 5
<b>Abril</b>	4 – 5
<b>Mayo</b>	4 – 5
<b>Junio</b>	4 – 5
<b>Julio</b>	4 – 5
<b>Agosto</b>	4 – 5
<b>Septiembre</b>	5 – 6
<b>Octubre</b>	5 – 6
<b>Noviembre</b>	5 – 6
<b>Diciembre</b>	5 – 6
<b>Promedio brillo solar global anual</b>	<b>4 – 5</b>

Fuente: (IDEAM & UPME, sistema de informacion minero energetico Colombiano (SIMEC), 2005).

El conocimiento de la disponibilidad de la energía solar es indispensable, porque permite conocer cuál es la capacidad solar que se encuentra en el lugar de estudio para transformar toda esta energía solar en energía eléctrica y así conocer qué nivel de energía demandada se podrá suplir o generar por medio del sistema fotovoltaico.

Tabla 8. Radiación solar promedio mensual (NASA).

<b>DAILY RADIATION SOLAR HORIZONTAL</b>	
<b>Month</b>	<b>KWH/M<sup>2</sup></b>
<b>January</b>	5.05
<b>February</b>	4.80
<b>March</b>	4.66
<b>April</b>	4.26
<b>May</b>	4.23
<b>June</b>	4.19
<b>July</b>	4.23
<b>August</b>	4.22
<b>September</b>	4.54
<b>October</b>	4.45
<b>November</b>	4.41
<b>December</b>	4.68
<b>Promedio radiación solar global anual</b>	<b>4.48</b>

Fuente: (NASA, Astmospheric science data center, s.f.).

Se observó que en las (Tablas 6 y 8) la relación de radiación solar es variable, pero se mantiene dentro de los intervalos que indica la (Tabla 6), con respecto al

promedio mensual de radiación, igualmente se determinó que el recurso solar disponible en la zona se mantuvo en un intervalo de radiación entre 4.5 – 5.5 kWh/m<sup>2</sup>.

### 5.2.2 Estimación de la radiación solar y sus componentes por medio de cálculos matemáticos.

Para la estimación de radiación solar sobre un plano horizontal, a nivel de la tierra se utilizó el modelo de Hottel (1976) el cual calcula la radiación transmitida a través de la atmósfera clara, en función del ángulo cenital, la altitud para una atmósfera estándar y el tipo de clima. La radiación directa en función del ángulo cenital está dada por la expresión:

$$R_{DIR(\theta_z)} = a_o + a_1 \cdot e^{\left(\frac{-k}{\cos\theta_z}\right)} \quad (5.1)$$

$$a_o = r_o \left[ 0.4237 - 0.00821(6 - Z)^2 \right] \quad (5.2)$$

$$a_1 = r_1 \left[ 0.5055 + 0.00595(6.5 - Z)^2 \right] \quad (5.3)$$

$$a_k = r_k \left[ 0.2711 + 0.01858(2.5 - Z)^2 \right] \quad (5.4)$$

Donde a<sub>o</sub>, a<sub>1</sub> y a<sub>k</sub> son constantes; Z la altitud de la localidad sobre el nivel del mar (km); r<sub>o</sub>, r<sub>1</sub> y r<sub>k</sub> los factores de corrección que adquieren valores de 0,95, 0,98 y 1,02 respectivamente para el clima cálido según Passamai (2000).

La declinación solar, δ (o) que indica la posición angular del Sol al mediodía solar, respecto del plano del Ecuador, se calculó mediante la ecuación de Cooper (1969) que tiene en cuenta el día del año, y el coseno del ángulo cenital, θ<sub>z</sub> que muestra la posición del Sol respecto de la vertical:

$$\delta = 23.45 \text{sen} \left[ \frac{2\pi(284 + d_a)}{365} \right] \quad (5.5)$$

$$\cos\theta_z = \text{sen}\phi \cdot \text{sen}\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega_s \quad (5.6)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\phi \cdot \tan\delta) \quad (5.7)$$

Donde Φ es la latitud geográfica (o), que señala la posición angular del lugar donde se encuentra el panel fotovoltaico respecto del Ecuador terrestre: Es positivo en el

hemisferio Norte y negativo en el Sur; ws el ángulo horario al alba o al ocaso (radianes).

La radiación difusa sobre superficie horizontal, en función del ángulo cenital se calculó por la ecuación de Liu y Jordan (1960) y las radiaciones directa, difusa y global sobre el plano horizontal se determinaron según las ecuaciones siguientes:

$$R_{DIF(\theta_z)} = 0.2710 - 0.2939R_{DIR(\theta_z)} \quad (5.8)$$

$$R_{DIR(0)} = R_{DIR(\theta_z)} \cdot R_{E(0)} \cdot \cos\theta_z \quad (5.9)$$

$$R_{DIF(0)} = R_{DIF(\theta_z)} \cdot R_{E(0)} \cdot \cos\theta_z \quad (5.10)$$

$$R_{G(0)} = R_{DIR(0)} + R_{DIF(0)} \quad (5.11)$$

Donde:

$R_{DIR(0)}$ : es la radiación directa ( $W m^2/día$ ).

$R_{DIF(0)}$ : la radiación difusa ( $W m^2/día$ ).

$R_{E(0)}$ : la radiación extraterrestre diaria mensual sobre superficie plana ( $W m^2/día$ ).

$R_{G(0)}$ : la radiación global ( $W m^2/día$ ).

La determinación de las componentes de la radiación solar en función de la inclinación de la superficie del panel fotovoltaico se realizó mediante el método de Solener (Vela, 1999). Este método parte del conocimiento previo de la radiación global, radiación extraterrestre, radiación directa, radiación difusa sobre una superficie plana y el coeficiente de reflectividad o albedo ( $\rho$ ) con valor de 0,20. La inclinación del panel, el índice de claridad y la fracción de difusa se obtuvieron de las ecuaciones siguientes:

$$\beta = 3.7 + 0.69 * \phi \quad (5.12)$$

$$I_C = \frac{R_{G(0)}}{R_{E(0)}} \quad (5.13)$$

$$F_{DIF} = \frac{R_{DIF(0)}}{R_{G(0)}} = 1 - 1.13I_C \quad (5.14)$$

Donde:

B: es la inclinación del panel (o).

$\Phi$ : la latitud del lugar (o).

$I_{cel}$ : Índice de claridad.

$R_{G(0)}$ : la radiación global ( $W\ m^2/día$ ).

$F_{DIF}$ : la fracción difusa.

Las radiaciones directa, difusa, reflejada y global sobre una superficie inclinada se obtuvieron como:

$$R_{DIR(\beta)} = R_{G(0)}(1 - F_{DIF})R_B \quad (5.15)$$

$$R_{DIF(\beta)} = \frac{1 + \cos\beta}{2} R_{G(0)} \cdot I_c \quad (5.16)$$

$$R_{REF(\beta)} = \frac{1 - \cos\beta}{2} \rho \cdot R_{G(0)} \quad (5.17)$$

$$R_{G(\beta)} = R_{DIR(\beta)} + R_{DIF(\beta)} + R_{REF(\beta)} \quad (5.18)$$

Donde:

$R_{DIR(\beta)}$ : la radiación directa ( $W\ m^2/día$ ).

$R_{DIF(\beta)}$ : la radiación difusa ( $W\ m^2/día$ ).

$R_{REF(\beta)}$ : la radiación reflejada ( $W\ m^2/día$ ).

$R_{G(\beta)}$ : la radiación global ( $W\ m^2/día$ ).

### 5.2.3 Posición de los módulos fotovoltaicos.

La posición de los paneles fotovoltaicos es de gran importancia, ya que permite dar una mayor captación de la radiación incidente sobre la superficie de los paneles con respecto al movimiento que presenta el sol.

La posición de los paneles está basada en dos ángulos distintos: la orientación y la inclinación.

La orientación de los paneles será siempre al Sur (en el hemisferio norte), al ser la única posición donde aprovecharemos de un modo más completo a lo largo del año la radiación emitida por el Sol.

La energía que procede del Sol, captada en un panel, depende fundamentalmente del ángulo de inclinación que forma con la horizontal, ya que es más eficiente la captación de energía luminosa cuando el ángulo de incidencia de los rayos del Sol sobre los paneles sea perpendicular a la horizontal del panel.

En la caracterización del sistema de bombeo solar fotovoltaico, de acuerdo a lo anteriormente mencionado los paneles deben estar orientados mirando hacia el sur debido a que Colombia se encuentra en el hemisferio norte, además posicionándolos perpendicularmente a los rayos del sol.

La inclinación es directamente influyente con respecto a la latitud de la zona donde se caracterizara el sistema de bombeo, con una recomendación de inclinación entre  $10^{\circ}$  y  $15^{\circ}$  con el objetivo de prolongar la vida de servicio de los paneles con respecto a la acumulación del polvo y agua. El ángulo de inclinación se puede calcular con respecto a la ecuación (5.12).

$$\beta = 3.7 + 0.69 * \phi$$

Siendo  $\phi$  la latitud del lugar igual a  $5^{\circ}01'07''N$  que se midió con google maps (GPS).

$$\beta = 3.7 + 0.69 * 5.017 = 7.1573^{\circ}$$

Con respecto a la recomendación de la ecuación (5.12) se realiza una sugerencia que el ángulo de inclinación de los módulos fotovoltaicos se puede tomar como  $10^{\circ}$  sobre la superficie sobre la cual estará soportado y apuntando hacia el sur con respecto al hemisferio norte.

### **5.3 DETERMINACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO.**

#### **5.3.1 Caracterización del sistema de bombeo fotovoltaico.**

En la investigación se diseñó un sistema de bombeo fotovoltaico por considerarse una excelente solución para el suministro de agua a comunidades rurales; por no requerir prácticamente de mantenimientos y tener larga vida útil. El sistema propuesto trabajará con corriente directa y sin baterías; puesto que el agua bombeada durante las horas de sol pico (HSP) se almacenará en un tanque elevado para su uso posterior en el suministro de agua a las viviendas del sector. Según Guerra Borrás (2010) los pasos fundamentales para el dimensionamiento del sistema de bombeo fotovoltaico consiste en estimar los aspectos siguientes:

- Demanda de agua,  $D_a$ .
- Volumen del tanque para almacenar el agua,  $V_T$ .
- Parámetros técnicos del pozo.
- Seleccionar del tipo de bomba solar a utilizar.
- Diseñar el arreglo de paneles fotovoltaicos.
- Diseño hidráulico del sistema de bombeo.

##### **5.3.1.1 Determinación de necesidades hidráulicas.**

La demanda de agua para una población se determina en función del consumo de agua diaria por persona (tabla 9), la cantidad de personas y el tiempo considerado en el proyecto. Se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$D_a = \frac{DOT \cdot N_p}{1000} \quad (5.19)$$

Donde:

Da: Demanda de agua promedio para la población (m<sup>3</sup>/día).

DOT: Dotación (Litros por persona diario L/pd).

Np: Número de personas.

La determinación de las necesidades hidráulicas requieren del conocimiento del volumen de agua diario medio y discriminar la demanda en cuanto a su uniformidad en el tiempo (Castañeda, 2008). Según Alonso (2005), la demanda de agua puede estar dirigida hacia el consumo humano, de animales domésticos y para el riego de cultivos, para este caso se determinara una caracterización del sistema para suministrar agua a una pequeña población de seis casas.

Los valores que se describen en la tabla 9 son valores mínimos de promedio para orientar la caracterización del sistema de bombeo solar fotovoltaico cuando en el lugar de estudio no se encuentran datos reales del consumo de agua.

**Tabla 9. Consumo mínimo diario de agua.**

TIPO DE CONSUMO	LITROS/UNITARIO (L/U)
Habitante urbano	50
Habitante rural	30
Escolar	5
Paciente ambulatorio	5
Paciente hospitalizado	60
Lavado	2
Camello (una vez por semana)	250
Cabra y oveja	5
Vaca	20
Caballos, mulas y burros	20

Fuente: (Abella, 2005).

Según (Vela, 1999) un consumo de agua entre 100 y 150 litros por persona al día, se considera un criterio razonable de diseño para instalaciones situadas en comunidades rurales de países en desarrollo; aunque, esta cifra puede parecer muy baja en comparación con el consumo de agua en Europa que es de 300 L/día por personas.

Para realizar una buena proyección en la demanda de agua por parte del usuario o la necesidad que se esté presentando en la zona, hay que categorizar la demanda en cuanto a su consumo o demanda diaria. Para lo cual se puede clasificar de la siguiente manera (Castañeda A. , 2008):

- *Consumo continuo o demanda diaria:* como es el caso de abastecimiento de agua para casas de campo o chalets, en las que el consumo puede ser tanto por el día como por la noche, en invierno o en verano. En este caso es necesario determinar las necesidades diarias por persona y, en su caso, por cada animal que vaya a consumir agua del sistema y la capacidad del depósito de almacenamiento. Para asegurar un suministro continuo es necesario contar con un depósito de acumulación y un sistema de baterías para garantizar el suministro en cualquier situación.
- *Consumo estacional:* como en el caso de los sistemas de riego, en los que las necesidades de agua son aproximadamente proporcionales a la intensidad de la radiación solar, y habitualmente localizadas en el verano. No es necesario el uso de baterías.

### 5.3.1.2 Determinación de la altura total de bombeo.

La altura hidráulica de bombeo es la presión efectiva que debe vencer la bomba durante su funcionamiento (Alonso, 2005). Para su correcta determinación es necesario tener en cuenta los parámetros técnicos del pozo. Los cuales están comprendidos por: profundidad estática del pozo ( $H_e$ ) en m; profundidad dinámica del pozo ( $H_d$ ) en m; distancia entre el pozo y el tanque ( $D_h$ ) en m; desnivel entre la superficie del pozo y el tanque de almacenamiento ( $H_t$ ) en m. Estos parámetros se muestran en la figura 11.

$$H_T = H_t + H_d + L_e \quad (5.20)$$

$$L_e = \frac{18.91}{D^{1.87}} \quad (5.21)$$

Donde:

$H_T$ : Altura dinámica total (m).

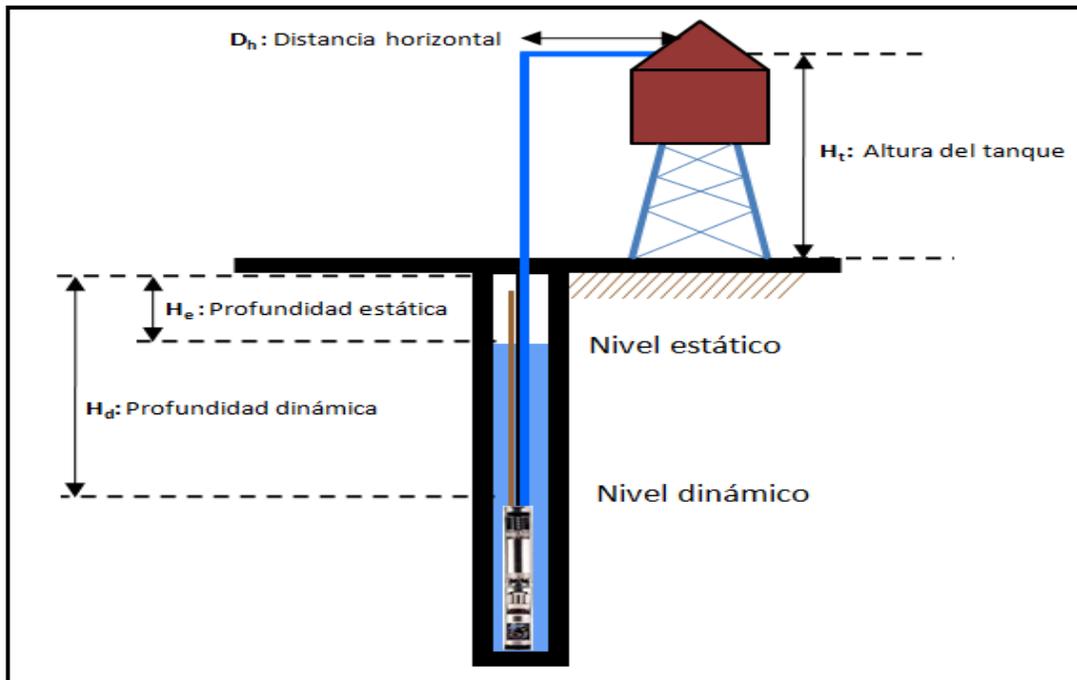
$H_t$ : Altura del tanque de almacenamiento desde el nivel del suelo (m).

$H_d$ : Nivel dinámico del agua en el pozo (m).

$L_e$ : Longitud equivalente (m).

$D$ : Diámetro de la tubería (m).

Figura 11. Alturas que intervienen en un sistema de bombeo.



Fuente: (Abella, 2005).

La capacidad del tanque para almacenar el agua se determina considerándose una autonomía de tres días. La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$V_T = 1.20V_d \quad (5.22)$$

$$V_d = D_a \cdot HSP \quad (5.23)$$

$$HSP = \frac{R_{G(\beta)}}{1000} \quad (5.24)$$

$$N_T = \frac{V_d}{V_T} \quad (5.25)$$

Donde:

$V_T$ : Volumen del tanque para almacenar el agua ( $m^3$ ).

$V_d$ : Volumen de agua diaria requerido por el sistema ( $m^3$ ).

$D_a$ : Demanda de agua promedio para la población ( $m^3/d$ ).

HSP: Horas de sol pico (h).

$R_{G(\beta)}$ : Radiación solar global sobre una superficie inclinada ( $W/m^2/dia$ ).

$N_T$ : Número de tanques.

La selección de la bomba de la familia Grundfos se realizó a partir del diagrama presentado por la firma a partir de los valores de la demanda de agua diaria ( $D_a$ ) en  $m^3$  y la altura dinámica total ( $H_T$ ) en m, obteniéndose el tipo de bomba más

apropiada de la marca SQF y la potencia pico del arreglo fotovoltaico expresada en  $W_p$ .

#### 5.4 DISEÑO HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE BOMBEO.

El caudal de bombeo se determinó en función del volumen del tanque elevado y de tiempo de funcionamiento de la bomba, a través de la ecuación siguiente:

$$Q_B = \frac{VT_{elev}}{T_B} \quad (5.26)$$

$$VT_{elev} = (0.10 \text{ a } 0.15)V_d \quad (5.27)$$

Donde

$Q_B$ : Caudal de bombeo ( $m^3/s$ ).

$V_{Telev}$ : Volumen del tanque elevado ( $m^3$ ).

$T_B$ : Tiempo de funcionamiento de la bomba (s).

$V_d$ : Volumen de agua diaria requerido por el sistema ( $m^3$ ).

El diámetro de la tubería de succión se obtuvo analíticamente mediante la ecuación siguiente, teniéndose en cuenta la velocidad recomendada en la tabla 10 y los criterios de que la velocidad mínima debe ser 0,45 m/s (Corcho y Duque, 1993) y la velocidad máxima igual a 1,45 m/s (RAS, 2000).

$$D_s = 1,1284 \sqrt{\frac{QB}{v_s}} \quad (5.28)$$

Donde:

$D_s$ : diámetro de la tubería de succión (m).

$Q_B$ : caudal de bombeo ( $m^3/s$ ).

$v_s$ : velocidad media del agua en la tubería de succión (m/s).

Tabla 10. Relación diámetro y velocidad.

DIÁMETRO (mm)	VELOCIDAD (m/s)
50	0.75
75	1.10
100	1.30
150	1.45
200	1.60
250	1.60
300	1.70
>400	1.80

Fuente: (Corcho & Duque).

Las pérdidas de carga en las tuberías de succión y descarga se determinaron por las ecuaciones siguientes. El coeficiente de pérdidas de carga en accesorios (K) se estimó a partir de los valores que se ofrecen en la tabla 11.

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (5.31)$$

$$h_{loc} = K \frac{V^2}{2g} \quad (5.32)$$

$$f = \frac{1.325}{\left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{R_e^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (5.33)$$

$$R_e = \frac{vD}{\nu} \quad (5.34)$$

Donde:

$h_f$ : Pérdida de carga por fricción (m).

L: Longitud de la tubería (m) < que la altura máxima de succión tabla.

v: Velocidad del agua en la tubería de succión (m).

D: Diámetro de la tubería de succión (m).

$h_{loc}$ : Pérdidas de carga localizadas en la tubería de succión (m).

K: Coeficiente de pérdida de cargas localizadas (adimensional).

$\varepsilon$ : Rugosidad relativa.

$R_e$ : Número de Reynolds.

$\nu$ : Viscosidad cinemática del agua (m<sup>2</sup>/s).

**Tabla 11. Coeficiente de pérdidas de carga en accesorios (K).**

PIEZA O ACCESORIO	K
<b>Compuerta abierta</b>	1
<b>Codo 90°</b>	0.90
<b>Codo 45°</b>	0.40
<b>Curva 90°</b>	0.40
<b>Curva 45°</b>	0.20
<b>Curva 22.30°</b>	0.10
<b>Rejilla</b>	0.75
<b>Boquillas</b>	2.75
<b>Válvula de angula abierta</b>	5.00
<b>Válvula de compuerta abierta</b>	0.20
<b>Válvula tipo globo abierta</b>	10.0
<b>Salida de tubo</b>	1.00
<b>Entrada normal de tubo</b>	0.50
<b>Entrada de borda</b>	1.00
<b>Válvula de pie</b>	1.75
<b>Válvula de retención</b>	2.50
<b>Ampliación gradual</b>	0.30*
<b>Reducción gradual</b>	0.15*

Fuente:(mecánica de fluidos).

El diámetro de la tubería de descarga ( $D_d$ ) en sistemas que no trabajan las 24 horas del día se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$D_d = 1.3\lambda^{1/4}(\sqrt{Q_B}) \quad (5.35)$$

$$\lambda = \frac{T_B}{24} \quad (5.36)$$

Donde:

$D_d$ : diámetro de la tubería de descarga (m).  
 $\lambda$ : Coeficiente de regularidad horaria del bombeo (adim).  
 $Q_B$ : Caudal de bombeo (m<sup>3</sup>/s).  
 $T_B$ : Tiempo de funcionamiento de la bomba (s).

La carga dinámica total (CDT) se estimó mediante la ecuación siguiente:

$$CDT = H_s \pm H_d + hf_s + hf_d + hloc_s + hloc_d + \frac{v_d^2}{2g} \quad (5.37)$$

Donde:

CDT: Carga dinámica total (m).  
 $H_s$ : Altura estática de succión (m).  
 $H_d$ : Altura estática de descarga (m).  
 $hf_d$ : Pérdida de carga por rozamiento en la descarga (m).  
 $hloc_s$ : Pérdida localizada en la succión (m).  
 $hloc_d$ : Pérdida localizada en la descarga (m).  
 $v_d$ : Velocidad en la tubería de descarga (m/s).

La carga neta de succión positiva de la bomba (NPSH) es parámetro que indica la máxima altura de succión que permite el sistema, para su estimación se utilizaron las siguientes ecuaciones. Los valores de presión atmosférica y de vapor en función de la altura se muestran en la tabla 12 y la altura máxima de succión en la tabla 13.

$$NPSH_d = P_{atm} - (P_v + \Delta Z_s + \sum hf_s) \gg 0 \quad (5.38)$$

$$NPSH_r = K.Q^2 \quad (5.39)$$

$$K = 0.0826 f \left( \frac{L}{D^5} \right) \quad (5.40)$$

Donde:

$NPSH_d$ : Carga neta de succión positiva disponible (m).  
 $NPSH_r$ : Carga neta de succión positiva requerida (m).  
 $P_{atm}$ : Presión atmosférica (10,33 m).  
 $P_v$ : Presión de vapor (m).  
 $\Delta Z_s$ : Diferencia de altura en la succión (m).  
 $hf_s$ : Pérdidas de carga en la succión (m).

Tabla 12. Presión atmosférica y de vapor en función de la altura.

Altitud (m)	P <sub>atm</sub> (m)	Temperatura (°C)	P <sub>v</sub> (m)
0	10.33	0	0.062
250	10.03	5	0.089
500	9.73	10	0.125
750	9.43	15	0.174
1000	9.13	20	0.238
1250	8.83	25	0.323
1500	8.53	30	0.432
1750	8.25	35	0.573
2000	8.00	40	0.752
2250	7.75	45	0.977
2500	7.57	50	1.258
2750	7.28	55	1.605
3000	7.05	60	2.031
3250	6.83	70	3.177
3500	6.62	75	3.931
3750	6.41	80	4.829
4000	6.20	85	5.894
4250	5.98	90	7.149
4500	5.78	95	8.619
-	-	100	10.332

Fuente: (Mossande., 2014).

**Tabla 13. Altura máxima de succión.**

Altitud (m)	Presión atmosférica (m H <sub>2</sub> O)	Limite practico de succión (m)
0	10.33	7.60
300	10.00	7.40
600	9.64	7.10
900	9.30	6.80
1200	8.96	6.50
1500	8.62	6.25
1800	8.27	6.00
2100	8.00	5.70
2400	7.75	5.50
2700	7.50	5.40
3000	7.24	5.20

Fuente: (Mossande., 2014).

La verificación de la cavitación en el sistema se realizó teniendo en cuenta las condicionantes siguientes:

$$NPSH_d > NPSH_r$$

$$C = NPSH_d - NPSH_r$$

Si  $C > 0$ : No se genera cavitación:

Si  $C < 0$ : Se genera cavitación:

La velocidad específica de la bomba y la potencia del conjunto bomba motor se determinaron por las ecuaciones siguientes:

$$N_s = \frac{n\sqrt{Q_B}}{H^{3/4}} \quad (5.41)$$

$$P_{B-M} = \frac{Q_B \cdot H}{\eta_{B-M}} \quad (5.42)$$

Donde:

$N_s$ : velocidad específica (rpm).

$n$ : velocidad de rotación (rpm)

$Q_B$ : caudal de la bomba ( $m^3/s$ ).

$H$ : carga de la bomba (m).

$P_{B-M}$ : potencia del conjunto bomba y el motor (kW).

$\eta_{B-M}$ : eficiencia del conjunto bomba – motor (adim).

El golpe de ariete es una sobrepresión ( $\Delta p$ ) que se produce en la tubería de conducción de un sistema de bombeo debido a la interrupción del flujo por diferentes causas; siendo necesario calcular la magnitud de este fenómeno, para poder conocer la resistencia que debe tener la tubería en los puntos críticos.

$$\Delta P = \frac{145v_d}{\sqrt{1 + \frac{E_a \cdot D_d}{E_t \cdot e}}} \quad (5.43)$$

Donde:

$\Delta p$ : sobrepresión por golpe de ariete (m).

$v_d$ : velocidad del agua en la tubería de descarga (m/s).

$E_a$ : módulo de elasticidad del agua (kg/cm<sup>2</sup>).  
 $E$ : módulo de elasticidad de la tubería (kg/cm<sup>2</sup>). Ver tabla 14.  
 $D_d$ : diámetro interior de la tubería (m).  
 $e$ : espesor de la tubería (m).  
 $L$ : longitud de la tubería (m).  
 $C$ : celeridad de la onda de presión (m/s).

**Tabla 14. Módulos de elasticidad.**

MATERIAL	E (Kg/cm <sup>2</sup> )
Acero	2 100 000
Hierro fundido	930 000
Concreto simple	125 000
Fibrocemento	328 000
PVC	31 4000
Polietileno	5 200
Agua	20 670

Fuente: (Mossande., 2014).

El tiempo de propagación de la onda ( $T_p$ ) se determinó como sigue:

$$T_p = \frac{2L}{C} \quad (5.44)$$

$$C = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + \frac{E_a \cdot D_d}{E_t \cdot e}}} \quad (5.45)$$

Donde:

$T_p$ : tiempo de propagación de la onda (s).  
 $L$ : longitud de la tubería (m).  
 $C$ : celeridad de la onda de presión (m/s).

La longitud crítica de la tubería ( $L_c$ ) es la distancia entre el final de la impulsión y el punto crítico en dicha tubería. Para su determinación se empleó la siguiente ecuación:

$$L_c = \frac{C \cdot T_p}{2} \quad (5.46)$$

El tipo de cierre para evitar el golpe de ariete debe ser de la forma siguiente:

Sí  $L < L_c$ ; El cierre es lento.

$$T_p \triangleright \frac{2L}{C}$$

Sí  $L > L_c$ ; El cierre es rápido.

$$T_p \triangleleft \frac{2L}{C}$$

La presión generada por el golpe de ariete se determinó mediante la suma de la altura estática de descarga y la sobrepresión por golpe de ariete, según la ecuación siguiente:

$$P = H_d + \Delta p \tag{5.47}$$

Donde:

$\Delta p$ : sobrepresión por golpe de ariete (m).

$H_d$ : altura estática de descarga (m).

## 5.5 DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.

El diseño del sistema fotovoltaico consistió en la determinación de los siguientes parámetros:

- Demanda de energía.
- Numero de paneles fotovoltaicos
- Corriente de entrada al regulador de carga.
- Potencia del inversor
- La sombra entre paneles

### 5.5.1 Demanda de energía

$$E_{CA} = \frac{\sum_{i=1}^n N_C \cdot P \cdot T_f}{\eta_I \cdot \eta_B} \tag{5.48}$$

Donde:

$E_{CA}$ : Consumo diario de energía de corriente alterna (Wh/día)

$N_C$ : Cantidad de consumidores de igual tipo.

P: Potencia consumida por el equipo (W)  
T<sub>f</sub>: Tiempo de uso diario (h/d)  
η<sub>B</sub>: eficiencia del inversor (0.90).

### 5.5.2 Numero de módulos fotovoltaicos

$$N_m = \frac{E_{CA}}{P_{pp} \cdot HSP \eta_d} \quad (5.49)$$

Donde:

N<sub>m</sub>: Número de módulos fotovoltaicos.

P<sub>pp</sub>: Potencia pico del panel fotovoltaico (Wp).

HSP: Horas de sol Pico (h)

η<sub>d</sub>: Perdidas en el generador fotovoltaico (25%), debido a conexión y dispersión de parámetros, punto de trabajo del sistema que generalmente no coincide con el punto de máxima potencia de los paneles y la disminución de potencia entre la nominal y la real de los módulos (Abella, 2016).

### 5.5.3 Corriente de entrada al regulador de carga

$$I_{ent} = 1,20 N_{mp} \cdot I_M \quad (5.50)$$

Donde:

I<sub>ent</sub>: Corriente de entrada al regulador (A).

N<sub>mp</sub>: Número de módulos conectados en paralelos.

I<sub>M</sub>: Corriente en el punto de máxima potencia del panel fotovoltaico (A).

### 5.5.4 Potencia del inversor

$$P_{inv} = 1.20 E_{CA} \quad (5.51)$$

$$P_{inv} > P_{ts}$$

Donde:

P<sub>inv</sub>: Potencia nominal del inversor

P<sub>ts</sub>: Potencia total del sistema

E<sub>CA</sub>: Consumo diario de energía de corriente alterna (Wh/día).

## 5.6 ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico del sistema solar fotovoltaico para el bombeo de agua se realizó teniendo en cuenta la inversión inicial, el costo de operación y mantenimiento; así como el costo de instalación. En la inversión inicial se consideró los paneles fotovoltaicos, el regulador de carga, la bomba solar y otros accesorios.

El costo de operación y mantenimiento se estimó según Lara (2007) a partir de la relación de 20 USD más 0,02 USD/Wp al año. El tiempo de recuperación de las inversiones se calculó según Sandia National Laboratories (2014) a partir de la siguiente ecuación:

$$T_R = \frac{C_s}{A_E} \quad (5.52)$$

$$A_E = C_E \cdot EAP \quad (5.53)$$

$$EAP = E_{CA} \cdot HSP \cdot 365 \quad (5.54)$$

Donde:

$T_R$ : Tiempo de recuperación de las inversiones (años).

$C_s$ : Costo del sistema (USD).

$A_E$ : Ahorro de energía (USD).

$C_E$ : Costo de la energía anual promedio (USD/kWh).

$EAP$ : Energía anual producida (kWh).

$E_{CA}$ : Energía del generador fotovoltaico (kWh/día).

$HSP$ : Número de horas solar pico (h).

## 6. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS.

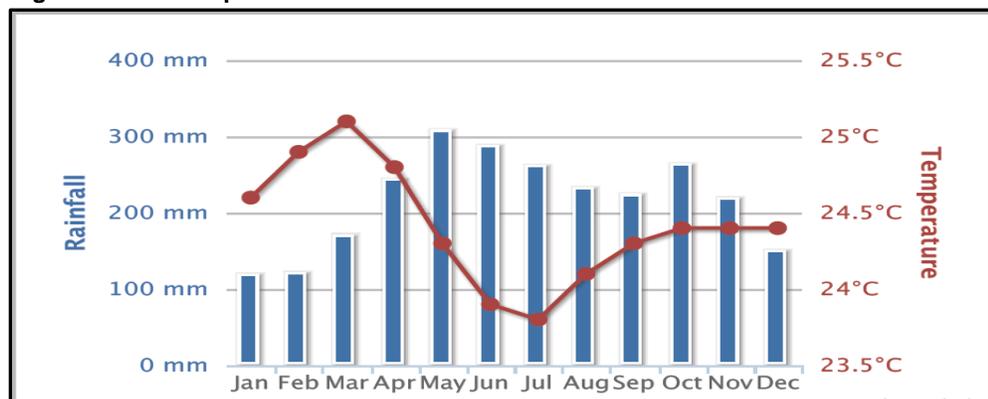
### 6.1 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES CLIMATOLÓGICAS.

En la figura 12 se presentan los valores promedios de las variables climáticas de la zona donde se analizó la caracterización del sistema de bombeo solar fotovoltaico. Se observa que la temperatura es máxima para los meses de enero, febrero, marzo y diciembre alcanzando una temperatura promedio de 26 °C. Y la temperatura mínima alcanzo los valores más bajos en junio y julio con 24 °C.

La humedad relativa se mantuvo estable durante todo el año con valores muy próximos al 70 %; aunque se incrementó en los meses de febrero y marzo desde 75% hasta 79%.

La velocidad del viento fue la variable más uniforme en cuanto a su valor, con un promedio mensual de 5 m/s. Las precipitaciones fueron escasas con los valores más elevados en los meses de mayo junio y julio comprendidos entre 310 y 280 mm.

Figura 12. Valores promedio de las variables climáticas.



Fuente: (University of East Anglia, 2012).

### 6.2 ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN SOLAR

En la tabla 15 se muestra el comportamiento de la radiación directa, difusa, global y extraterrestre referida a una superficie horizontal. Estas se obtuvieron con los datos obtenidos a partir de la simulación matemática mediante el método de Hottel (1976). Se puede observar el comportamiento de la radiación global en los diferentes meses del año encontrándose valores comprendidos entre los 5911,43 y 7647,08 W/m<sup>2</sup>día para los meses de diciembre y abril respectivamente. Esto representa el rango de energía solar fotovoltaica que se tendrá disponible en la localidad para la generación de energía eléctrica necesaria en el funcionamiento del sistema de bombeo con este tipo de energía renovable.

La radiación solar disponible para la región de estudio según el atlas de radiación solar tiene un valor estimado en 5000 W/m<sup>2</sup>día; lo cual se realiza un modelo

matemático para corroborar el dato anteriormente mencionado en el cual la radiación obtenida es de 5911,43 W/m<sup>2</sup>día, para el mes más crítico; por lo que se demuestra que los resultados alcanzados con el modelo matemático son confiables para su utilización en el diseño del sistema fotovoltaico.

**Tabla 15. Radiación solar sobre una superficie horizontal.**

Mes	d <sub>m</sub>	d <sub>a</sub>	R <sub>E(0)</sub> (W m <sup>-2</sup> )	δ (°)	ω <sub>s</sub> (°)	cosθ <sub>z</sub>	R <sub>DIR(θ<sub>z</sub>)</sub> (W m <sup>-2</sup> )	R <sub>DIR(0)</sub> (W m <sup>-2</sup> )	R <sub>DIF(θ<sub>z</sub>)</sub> (W m <sup>-2</sup> )	R <sub>DIF(0)</sub> (W m <sup>-2</sup> )	R <sub>G(0)</sub> (W m <sup>-2</sup> )
Ene.	31	17	9497,00	-20,917	1,537	0,899	0,640	5465,16	0,083	707,78	6172,93
Feb.	28	47	10072,00	-12,955	1,551	0,951	0,650	6229,83	0,080	764,67	6994,50
Mar.	30	75	10458,00	-2,418	1,000	0,991	0,658	6822,10	0,078	804,95	7627,06
Abr.	30	105	10419,00	9,415	1,000	0,997	0,659	6843,70	0,077	803,39	7647,08
May.	31	135	10078,00	18,792	1,000	0,971	0,654	6402,16	0,079	770,41	7172,57
Jun.	30	162	9804,00	23,086	0,999	0,950	0,650	6060,04	0,080	744,20	6804,24
Jul.	31	198	9874,00	21,184	0,999	0,960	0,652	6183,73	0,079	752,04	6935,77
Ago.	31	228	10179,00	13,455	1,000	0,989	0,657	6618,89	0,078	782,83	7401,72
Sep.	30	258	10350,00	2,217	1,000	0,999	0,659	6813,82	0,077	798,53	7612,35
Oct.	31	288	10140,00	-9,599	1,000	0,968	0,654	6412,27	0,079	774,24	7186,51
Nov.	30	318	9630,00	-18,912	1,000	0,914	0,643	5660,93	0,082	721,61	6382,54
Dic.	31	344	9299,00	-23,050	0,999	0,882	0,636	5222,71	0,084	688,72	5911,43

Fuente:(Modelo matemático de Hottel).

La tabla 16 muestra el comportamiento de la radiación solar global para una inclinación del panel de 5°. Se observa que con esta inclinación se logran valores superiores de radiación solar las cuales varían entre 8682,43-11779,22 W/m<sup>2</sup>día durante todo el año; correspondiendo la menor energía solar al mes de diciembre y la mayor al mes de marzo. La dinámica de la radiación solar indica que en todos los meses se logra una radiación superior a los 8000 W/m<sup>2</sup>día.

**Tabla 16. Radiación solar sobre una superficie inclinada.**

Mes	R <sub>B</sub>	I <sub>c</sub>	F <sub>DIF</sub>	R <sub>DIR(0,β)</sub> (W m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )	R <sub>DIF(0,β)</sub> (W m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )	R <sub>REF(0,β)</sub> (W m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )	R <sub>G(0,β)</sub> (W m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )
Ene.	1,15	0,65	0,27	5214,02	3943,97	21,03	9179,03
Feb.	1,08	0,69	0,22	5927,89	4774,58	23,83	10726,30
Mar.	1,00	0,73	0,18	6285,56	5467,67	25,99	11779,22
Abr.	0,92	0,73	0,17	5834,88	5517,00	26,06	11377,93
May.	0,86	0,71	0,20	4960,80	5017,78	24,44	10003,02
Jun.	0,82	0,69	0,22	4375,71	4641,87	23,18	9040,76
Jul.	0,84	0,70	0,21	4624,39	4788,88	23,63	9436,90
Ago.	0,89	0,73	0,18	5412,88	5290,50	25,22	10728,60
Sep.	0,97	0,74	0,17	6136,88	5503,45	25,94	11666,27
Oct.	1,05	0,71	0,20	6043,18	5006,51	24,49	11074,18
Nov.	1,13	0,66	0,25	5401,54	4158,13	21,75	9581,42
Dic.	1,17	0,64	0,28	4968,37	3693,91	20,14	8682,43

Fuente:(Modelo matemático de Solener).

En esta investigación se sugiere instalar los paneles con una inclinación de 10° como se sugiere en el subíndice (5.2.3) orientados hacia el Sur; porque según (Prado, 2008) ofrece la ventaja de garantizar el drenaje del agua y reducir la acumulación de polvo sobre la superficie del panel. Este ángulo incrementa

notablemente el valor de la radiación solar respecto al que ocurre sobre un ángulo llano.

Otros autores como Lara (2007) al considerar que el cálculo exacto de la inclinación del panel fotovoltaico es muy laborioso, aceptan que la inclinación del panel puede ser igual a 0,90 de la latitud del lugar de emplazamiento.

La estimación de la radiación solar global mediante la modelación matemática es de gran importancia para determinar las condiciones que se presentan en la vereda Agua Blanca, en el municipio de Tauramena, debido a la carencia de información climatológica para el desarrollo de este proyecto. En este sentido Passamai (2000) y Solartronic (2003) sostienen que los modelos empíricos pueden ser utilizados para el cálculo de la radiación global y sus componentes directo y difuso con sencillez y relativa facilidad.

Por otra parte la aplicabilidad de la modelación matemática ha sido verificada por varios investigadores de diversas regiones del mundo como Duffie y Beckman (1991). Lo anterior favorece a muchos países que no poseen estaciones meteorológicas para la medición de los datos de radiación solar requerida en el conocimiento del potencial y el desempeño de los sistemas fotovoltaicos (Lucano y Fuentes, 2010).

### 6.3 ANÁLISIS DE LA DEMANDA DE AGUA

El sistema solar fotovoltaico propuesto beneficiará un total de seis familias para una población total de 24 personas. Considerándose una dotación de 100 L P/día, se obtiene una demanda de agua de 2,40 m<sup>3</sup> por día y 72 m<sup>3</sup> por mes. Este volumen de agua puede ser almacenado en un tanque elevado de 8000 litros por unidad (8 m<sup>3</sup>) para una autonomía de tres días. Estos tanques son cilíndricos horizontales de polietileno de media densidad de la marca Bertotto-Bogliione de cabezales elipsoidales con una base de apoyo integral. Este tipo de sistema según Sarmiento (2013) es más barato, sencillo y requiere de menos mantenimientos.

Si se considera los valores mensuales de las horas solar pico es posible acumular entre 25 y 33.6 m<sup>3</sup> de agua diaria que se almacenarían en cuatro tanques, lo que permite incrementar el servicio de suministro de agua para una población comprendida entre 60 y 84 personas (tabla 17).

Tabla 17. Volumen de agua disponible según HSP y número de tanques.

Mes	HSP (h)	V <sub>d</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>T</sub> (m <sup>3</sup> )	N <sub>T</sub>
<b>Ene</b>	9,2	22,0	26,4	3
<b>Feb</b>	10,7	25,7	30,9	4
<b>Mar</b>	11,8	28,3	33,9	4
<b>Abr</b>	11,4	27,3	32,8	4

<b>May</b>	10,0	24,0	28,8	4
<b>Jun</b>	9,0	21,7	26,0	3
<b>Jul</b>	9,4	22,6	27,2	3
<b>Ago</b>	10,7	25,7	30,9	4
<b>Sep</b>	11,7	28,0	33,6	4
<b>Oct</b>	11,1	26,6	31,9	4
<b>Nov</b>	9,6	23,0	27,6	3
<b>Dic</b>	8,7	20,8	25,0	3

Fuente: Autor.

#### 6.4 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO

De acuerdo con las características del área experimental se escogió una bomba centrífuga sumergible solar del tipo Grundfos y marca SQF 2.5-2; por lo que en este trabajo se puede seleccionar un caudal de 2,2 m<sup>3</sup>/h. La bomba fue seleccionada a partir de la tabla 18 considerándose la demanda de agua diaria señalada anteriormente y una carga H<sub>T</sub> de 19 m. En las tablas 19 y 20 se exponen las características técnicas y eléctricas de este tipo de bomba.

Tabla 18. Selección de la bomba en función de H<sub>T</sub> (m) y D<sub>a</sub> (m<sup>3</sup>/día).

5 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m	110 m	120 m	Wp
11.7	7.7	5	2.1	1.8	1.6	1.4	1.1	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1	172
34	46	12.1	7.2	4.7	3.9	3.4	3.1	2.8	2.5	2.2	1.9	1.6	344
53.7	26	17.8	12.3	8.6	6.5	5.6	4.7	4.1	3.9	3.6	3.2	2.9	516
72.1	36.3	20.8	16.7	12.5	9.6	7.7	6.8	6.9	5	4.3	4.1	3.8	688
87.7	46.6	23.2	19.1	15.9	12.8	10.1	8.2	7.4	6.6	5.9	5.1	4.3	860

						
SQF 5A - 3	SQF 8A-3	SQF 14A -3	SQF 2.5 -2	SQF 1.2-2	SQF 0.6 - 2	SQF 5A - 6

Fuente:(Catalogo bombas Grundfos).

**Tabla 19. Datos técnicos de las bombas Grundfos.**

Modelo	Dimensiones en mm			Peso en kg	Para diferencia	Caudal máx. x hora (m <sup>3</sup> /h)
	Alto	Diámetro en mm.	Descarga		manométrica de	
SQF 0.6-2	1185	76	Rp 1 ¼	7,6	10 a 120 m	0,6 a 0,6
SQF 0.6-3	1235	76	Rp 1 ¼	7,9	80 a 200 m	0,6 a 0,6
SQF 1.2-2	1225	76	Rp 1 ¼	7,9	10 a 120 m	1,3 a 1,2
SQF 1.2-3	1295	76	Rp 1 ¼	8,2	90 a 250 m	1,3 a 1
SQF 2.5-2	1247	76	Rp 1 ¼	8,2	5 a 120 m	2,8 a 2,2
SQF 3A-10	968	102	Rp 1 ¼	9,5	30 a 70 m	4,9 a 3
SQF 5A-3	815	102	Rp 1 ½	8,1	2 a 15 m	9 a 6,4
SQF 5A-7	905	102	Rp 1 ½	8,8	10 a 50 m	9 a 4
SQF 8A-3	920	102	Rp 2	9,5	2 a 10 m	18 a 12
SQF 8A-5	1011	102	Rp 2	10,5	2 a 30 m	16 a 7
SQF 11A-3	982	102	Rp 2	10,9	2 a 15 m	19 a 14

Fuente:(Catalogo bombas Grundfos).

**Tabla 20. Características eléctricas de las bombas Grundfos.**

Datos eléctricos		
DC 30 - 300 V		
AC 90 - 240 V		
50/60 Hz		
Tipo de bomba	Potencia máxima W	Intensidad máxima A
SQF 0.6-2 (N)	900	8.4
SQF 0.6-3 (N)	900	8.4
SQF 1.2-2 (N)	900	8.4
SQF 2.5-2 (N)	900	8.4
SQF 3A-10 (N)	1400	8.4
SQF 5A-3 (N)	1400	8.4
SQF 5A-6 (N)	1400	8.4
SQF 8A-3 (N)	1400	8.4
SQF 8A-5 (N)	1400	8.4
SQF 11A-5 (N)	1400	8.4

Fuente:(Catalogo bombas Grundfos).

El motor de la bomba puede ser del modelo ETADRIVE HR 600W/1200W con un controlador de carga PS600/PS1200 para dirigir la electricidad generada en los módulos fotovoltaicos hacia la motobomba en el tiempo de duración de las horas de sol. Se utilizará el acoplamiento directo para la conexión entre el arreglo fotovoltaico y la motobomba por ser simple y sugerida para sistemas fotovoltaicos de pequeña potencia (Valer, 2011).

## 6.5 ANÁLISIS DEL DISEÑO HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE BOMBEO.

Las características del sistema hidráulico están conformados por diferentes aspectos importantes que se tienen que tener en cuenta para el diseño del sistema de bombeo las cuales se describen en la tabla 21. El diseño del sistema hidráulico cuenta con un caudal de bombeo de 2.20 m<sup>3</sup>/h con un tiempo de bombeo aproximado de 4 horas para llenar el tanque en su totalidad, el cual tiene una

capacidad de 8 m<sup>3</sup> de agua. Se determina que el sistema hidráulico tiene una carga dinámica total de 23.32 m (columnas de agua).

Otras características del sistema hidráulico se mencionan en las tablas 22, 23, 24 y 25 las cuales contienen datos pertinentes a las dimensiones de la tubería de succión y descarga, igualmente pérdidas en longitud y accesorios en el diseño hidráulico. También se estima los puntos críticos, para evitar el golpe de ariete en la tubería y la cavitación en el sistema hidráulico.

**Tabla 21. Parámetros de la bomba.**

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
Caudal de la bomba, $Q_B$ (m <sup>3</sup> /h)	2,20
Tiempo de bombeo, $T_B$ (h)	3,70
Diámetro de la succión, $D_s$ (m)	0,076
Diámetro de la descarga, $D_d$ (m)	0,025
Velocidad de rotación de la bomba, $n$ (rpm)	1500
Rendimiento de la bomba, $\eta_B$ (rpm)	0,65
Coefficiente de regularidad horaria del bombeo, $\lambda$	0,15
Carga dinámica total, CDT (m)	23,32
Carga neta de succión positiva disponible, $NPSH_d$ (m)	5,96
Carga neta de succión positiva requerida, $NPSH_r$ (m)	0,0009

Fuente: Autor.

**Tabla 22. Parámetros generales de las tuberías.**

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
Módulo de elasticidad para el PVC, $E$ (kg/s)	31400,00
Rugosidad absoluta, $\varepsilon$ (m)	0,015
Espesor, $e$ (m)	0,004

Fuente: Autor.

**Tabla 23. Parámetros de la tubería de succión.**

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
Velocidad del agua en la tubería de succión, $V_s$ (m/s)	1,10
Número de Reynolds, $Re$	104500,00
Pérdidas por fricción en la tubería, $h_{fs}$ (m)	1,94
Pérdidas localizadas, $h_{locs}$ (m)	0,03
Pérdidas totales, $h_{Ts}$ (m)	1,98

Fuente: Autor.

**Tabla 24. Parámetros de la tubería de descarga.**

Parámetros	Valor
Velocidad del agua en la tubería de descarga, $V_d$ (m/s)	0,75
Número de Reynolds, $R_e$	23437,50
Perdidas por fricción en la tubería, $h_{fs}$ (m)	2,31
Perdidas localizadas, $h_{locs}$ (m)	0,01
Pérdidas totales, $h_{Ts}$ (m)	2,32

Fuente: Autor.

**Tabla 25. Parámetros del golpe de ariete.**

Parámetros del golpe de ariete	Valor
Celeridad de la onda de presión (m/s), $c$ ( $m\ s^{-1}$ )	1424,50
Tiempo de propagación de la onda, $T_p$ (s)	0,01
Longitud crítica de la tubería, $L_c$ (m)	5,00
Sobrepresión debido al golpe de ariete, $\Delta_p$ (m)	48,09
Presión generada por el golpe de ariete, $P$ (m)	52,09

Fuente: autor.

## 6.6 ANÁLISIS DEL ARREGLO FOTOVOLTAICO

Los paneles fotovoltaicos instalados fueron de la marca ATERA, modelo YB-156M36-150 con las características que se muestran en la figura 13, los cuales se adaptan a las condiciones que se presentan en la zona donde se caracterizó el sistema de bombeo solar fotovoltaico. Es así que sus características eléctricas y mecánicas y su vida útil tiene una garantía durante un lapso de tiempo de 20 años.

**Figura 13. Características del panel fotovoltaico YB-156M36-150.**

<b>Características Eléctricas</b>	
Potencia máxima ( $P_{max}$ )	<b>150 W</b>
Voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ )	<b>22,0 V</b>
Eficiencia del modulo	<b>14,63 %</b>
Voltaje a máxima potencia	<b>18,0 V</b>
Corriente a máxima potencia	<b>8,35 A</b>
<b>Características Mecánicas</b>	
Célula solar	<b>Monocristalina</b>
Número de células	<b>36 (9x4)</b>
Tamaño de célula	<b>156 mm x 156 mm</b>
Dimensiones	<b>1480 x 66 x 45 mm</b>
Peso	<b>12 Kg</b>



Fuente: <http://solutechnia.com.co/solutechnia/>

Los principales parámetros del sistema fotovoltaico se describen en la tabla 26 con la cual se menciona que los módulos deben solventar una potencia de 900 W la cual es demandada por la bomba, así mismo la potencia del inversor debe ser acondicionada a la energía que requiere el sistema de bombeo solar fotovoltaico.

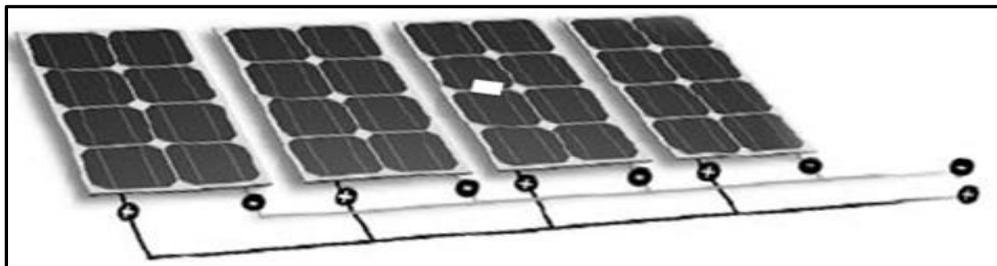
Tabla 26. Parámetros fundamentales del sistema fotovoltaico.

Parámetros	Valor
Potencia de la bomba, P (W)	900
Potencia pico del panel fotovoltaico, $P_{pp}$ (Wp)	150
Rendimiento del inversor, $\eta_I$ (%)	85
Factor de pérdidas de potencia en el panel fotovoltaico, $\eta_I$ (%)	25
Energía de corriente alterna requerida, $E_{CA}$ (kWh/día)	3,41
Número de módulos fotovoltaicos, $N_m$	10
Potencia del inversor, $P_{inv}$ (kW)	4,09

Fuente: Autor.

Estos generadores de corriente directa se conectaron en paralelo (cableado en paralelo) como se muestra de forma esquemática en la figura 14, conformando un arreglo fotovoltaico. Esto se debe según Lara (2007) a que son aplicaciones de consumo de corriente elevado.

Figura 14. Representación esquemática del cableado en paralelo.



Fuente: (Abella, 2005).

Entre el arreglo fotovoltaico y el motor se recomienda instalar un regulador que permita el mejoramiento del rendimiento diario del sistema y la protección ante posibles perturbaciones eléctricas.

Los resultados anteriores permitieron el dimensionamiento de los tres componentes principales del sistema: paneles fotovoltaicos, bomba y motor para un sistema sin baterías (figura 15). Este sistema se conformó de diez paneles fotovoltaicos, una bomba centrífuga sumergible con su motor correspondiente y el controlador de carga.

Figura 15. Componentes del sistema fotovoltaico.



Fuente: (Abella, 2005).

## 6.7 ANÁLISIS ECONÓMICO

Los resultados del análisis económico permitieron conocer el costo de la instalación con el fin de determinar la viabilidad económica del mismo, lo cual es de vital importancia, teniéndose en cuenta que el problema esencial de los sistemas fotovoltaicos es el costo de la inversión inicial. Estos sistemas poseen en general según Sandia *National Laboratories* (2014) una vida útil de 40 años o más; sin embargo, habitualmente requiere de 10 años para recuperar el costo inicial.

En las tablas 27, 28 y 29 se muestran los resultados de la estimación de los costos del sistema fotovoltaico, que se realizaron en función de los datos obtenidos de diferentes fuentes de información, sobre el costo en dólares de cada componente que comprende el sistema de bombeo solar fotovoltaico.

A partir de lo anterior se determinó que el costo de la instalación fue de 6267,797 dólares, como se puede ver en la tabla 29, lo que coincide con Lipinski *et al.*, (2002) quien indica que esta tecnología supone importantes inversiones de instalación; sin embargo presentaría un costo de ahorro energético de 688,76 dólares, comparado con un sistema que se alimente de combustible para poder realizar el mismo servicio que prestaría con un sistema de bombeo solar fotovoltaico. Adicionalmente estos sistemas tienden a tener unos costos muy bajos en mantenimiento reafirmando lo expuesto por el señor García (2002).

**Tabla 27. Datos utilizados para el cálculo económico**

DESCRIPCIÓN	VALOR USD
Costo de la energía: CE (\$/kWh)	0,15
Costo del sistema: $C_S$ (\$)	7407,797
Consumo de combustible: $C_{comb}$ (L/h)	1,25
Precio del combustible: $P_{comb}$ (\$/L)	1,36

Fuente: Autor.

**Tabla 28. Ahorro de energía y combustible a partir de la energía producida.**

DESCRIPCIÓN	VALOR USD
Energía anual producida: EAP (kWh)	4591,70
Ahorro de energía: AE (\$)	688,76
Tiempo de recuperación de las inversiones: TRI (años)	9,17
Ahorro de combustible: $A_{comb}$ (\$)	2295,85

Fuente: Autor.

**Tabla 29. Estimación de los costos de las obras anexas y el costo total.**

Descripción	Cantidad	UM	Costo unitario	Costo total
<b>Obras Anexas</b>				
Tanque de almacenamiento de PVC, 8000L, marca Bertotto-Boglione.	1	---	640	640
Torre base de tanque.	1	---	450	450
Subtotal				1090,00 0
Costo de la instalación				6267,79 7
Costo de operación y mantenimiento				50
Costo total				6317,79 7

Fuente: Autor.

**Tabla 30. Costos del sistema fotovoltaico.**

Descripción	Cantidad	UM	Costo unitario	Costo total
Módulo fotovoltaico modelo YB-156M36-150, 150 Wp.	10	USD	260,000	2600,000
Bomba Gundfos, modelo SQF 2,5-2.	1	USD	928,571	928,571
Controlador de carga PS600/PS1200	1	USD	119,226	119,226
Cable, interruptor y terminales para 30 m.	1	USD	30,000	30,000
Mano de obra para el montaje del sistema FV.	2	USD/H	3,125	1500,000
Subtotal				5177,797

Fuente: Autor.

En la tabla 30 se observa que el costo total del sistema de bombeo alimentado con energía solar fotovoltaica que utiliza diez paneles fotovoltaicos y cubre un área de 23.68 m<sup>2</sup> es de 5177,797USD. Este resultado aconseja que el dimensionamiento se realice de forma precisa como sugiere López-Rodríguez, *et al.*, (2005) debido al elevado costo de las instalaciones. Además debe tenerse en cuenta el criterio de Lipinski *et al.*, (2002) acerca de la necesidad de caracterizar bien su diseño y manejo para el logro de mayor rentabilidad por las significativas inversiones asociadas a esta tecnología.

Con la energía anual producida de 4591,70 kWh se logró un ahorro de energía equivalente de 688,76 USD, lo que permite un tiempo de recuperación de las inversiones de 9.17 años.

## 7. CONCLUSIONES

En el desarrollo del proyecto se siguió una serie de pasos para establecer finalmente que se le dio cumplimiento al objetivo general, el cual consistía en caracterizar un sistema de bombeo solar fotovoltaico para aplicaciones en zonas rurales.

Los sistemas de bombeo solar fotovoltaico establecen una alternativa de solución en zonas no interconectadas a la red nacional, por este motivo estos proyectos ayudaran a generar desarrollo y mejoramiento de la calidad de vida de estas poblaciones que pertenecen a zonas rurales del territorio nacional.

La utilización de la modelación matemática para la estimación de la radiación solar y sus componentes fue de gran utilidad en la vereda agua blanca perteneciente al municipio de Tauramena departamento del Casanare, ya que estos modelos ayudaron a disminuir el porcentaje de incertidumbre que se tenía en la zona de caracterización del sistema, con respecto a la radiación solar disponible, Debido a que los datos encontrados para la zona de interés se estiman alrededor de un promedio mensual de radiación de  $5\text{kWh/m}^2$  según la UPME y el IDEAM, pero estos datos están en función de la radiación para una superficie plana y el modelo matemático de Solener calcula la radiación de acuerdo a las coordenadas del lugar (altitud, longitud, msnm). Es decir tiene una precisión más exacta de la radiación solar la cual fue de  $5911,43\text{ kWh/m}^2$  con la cual se puede realizar los cálculos para determinar el campo de captación del sistema fotovoltaico.

Dada la sencillez de un sistema de bombeo directo como se estimó en este proyecto (paneles conectados directamente a bomba) se puede considerar la caracterización del sistema de bombeo solar fotovoltaico como un modelo para estas zonas del departamento de Casanare ya que las condiciones meteorológicas permanecen muy similares en toda esta zona del territorio rural.

La caracterización del sistema de bombeo solar fotovoltaico evidencia que de acuerdo a la necesidad hídrica y la disponibilidad del recurso solar se pueden diseñar sistemas modulares que se adapte fácilmente a las condiciones requeridas por los usuarios, ya sea para; agua para consumo humano, para irrigación de pequeñas parcelas y para abrevaderos de animales.

Desafortunadamente en Colombia no hay programas gubernamentales que apoyen este tipo de proyectos, debido a la poca promulgación y a los elevados costes de inversión iniciales, estas son grandes causas de la escasa inversión por entidades públicas/privadas o personas naturales. Desconociendo la gran importancia que ofrecen este tipo de energías alternativas las cuales promueven la independencia de los recursos limitados como lo es el petróleo y sus derivados los cuales le hacen mucho daño al medio ambiente por los gases tóxicos que arrojan a la atmósfera provocando el calentamiento del planeta.

## 8. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Continuar con el desarrollo de investigaciones sobre sistemas de bombeo de agua alimentados con energía solar fotovoltaica, a partir de la caracterización que se desarrolló en este proyecto.

En este estudio se han llevado a cabo cálculos matemáticos con datos estadísticos generales sencillos que para nada nos garantizan unos resultados precisos. Por otra parte dichos resultados nos sirven para comprender mejor el funcionamiento del sistema de modo global e intentar proponer soluciones a problemas que puedan surgir. Por lo tanto queda pendiente para quien se preste realizar trabajos futuros con la misma temática de este proyecto realizar mediciones reales de las variables de radiación en la zona donde se caracterizó el sistema de bombeo solar fotovoltaico para obtener valores reales y así determinar un diseño más real a las condiciones climatológicas del lugar de estudio.

Implementar el montaje y la instalación del sistema de bombeo solar fotovoltaico que se caracterizó en este proyecto, con el fin de observar su funcionamiento y desempeño para el cual fue diseñado. Además fortalecer su capacidad de demanda ya que el sistema está caracterizado para una población de 24 personas. Y teóricamente el sistema puede abastecer a una población que este comprendida entre los 60 y 80 personas esto es en función del recurso solar con el cual cuenta la zona de estudio de este proyecto.

Elaborar un manual que contenga la forma correcta de darle uso y mantenimiento a estos sistemas de bombeo alimentados por energía solar fotovoltaica. Ya que es muy poco la información que se conoce al respecto sobre su adecuada manipulación.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abella, M. A. (2005). *Introducción al diseño y dimensionado de instalaciones de energía solar fotovoltaica*. Segunda edición: Sistemas fotovoltaicos.
- AGRENER. (2002). *Cuarto encuentro de energía para el medio rural*. Campinas.
- Arrastia, M. A. (2012). energias y cambio climatico. *cuidad habana*, 247.
- Borras, A. G. (2010). *Dimensionamientos de sistemas de fuentes renovables de energía*. la Habana: Cubasolar.
- Castañeda, A. (2008). *La instalacion de un sondeo*. Primera edicion.
- Castañeda, A. (2008). *La instalacion de un sondeo*. Santiago de Chile.
- CEPYME-ARAGON. (2008). *Guia de las energias renovables aplicadas a las pymes*.
- Cisneros, B. J., & Tundasi, J. G. (2012). *Diagnóstico de agua para las americas*. Mexico Distrito Federal: Academica Mexicana de Ciencias.
- Ecofys Energy and Enveroment. (2001). *generators in agriculture and water management in the Netherlands, Germany, spain, France y Finland*. Netherlands.
- Enrique, C. C., & Andres, D. C. (2011). *Evaluación del potencial de energía eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos en las edificaciones y zonas endurecidas de la sede central de la Universidad Industrial de Santander. Trabajo de grado de ingeniero electricista*. Bucaramanga: Facultad de Ingenieria.
- Ernesto, C. G., & Julio, E. D. (2012). *sector solar fotovoltaico*. caribe colombiano.
- España. (2006). *Centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas*. españa: energias renovables.
- Forero, L. (2009). Presente y futuro de las energias renovables en colombia. *Cumbre Iberoamericana de energias* , (págs. 1-10). Mexico.
- GOMEZ, E. (2011). Energización de las zonas no interconectadas a partir de las energías renovables solar y eólica. *Gestion ambiental*. Bogota , Cundinamarca, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Gonzales, D. A. (2010). Prototipo de sistema de bombeo fotovoltaico para proyectos de cooperacion al desarrollo de tecnologias apropiadas. *Universidad Carlos III de madrid*, 1-150.

Gonzales, D. A. (28 de Julio de 2010). Prototipo de sistemas fotovoltaicos para proyectos de cooperacion al desarrollo con tecnologias apropiadas. Madrid, España, España: Universidad Carlos III de Madrid.

IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua*. Bogota.

IDEAM, & UPME. (2005). *Sistema de informacion de eficiencia energetica y energias alternativas (SIMEC)*. Obtenido de Sistema de informacion de eficiencia energetica y energias alternativas (SIMEC): <http://www.si3ea.gov.co/si3ea/Home/EnergiaSolar/tabid/74/language/en-US/Default.aspx>

IDEAM, & UPME. (2005). *sistema de informacion minero energetico Colombiano (SIMEC)*. Obtenido de sistema de informacion minero energetico Colombiano (SIMEC): [http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas\\_Radiacion\\_Solar/2-Mapas\\_Radiacion\\_Solar.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/2-Mapas_Radiacion_Solar.pdf)

*ingemecanica*. (2006). Obtenido de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn193.html>

Lara, A. F. (2007). *Diseño de un sistema de riego por medio de energia solar, a traves de paneles fotovoltaicos*. Valdivia Chile: Universidad Austral de Chile.

Lorenzo. (1994). *Electricidad solar*. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid.

Martinot, E., & Janet, S. (9 de septiembre de 2009). *world.com*. Obtenido de world.com: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/09/renewables-global-status-report-2009-update?cmpid=WNL-Friday-September11-2009>

Ministerio de ciencia e innovación. (2006). *ministerio de ciencia e innovacion de españa*. españa. Obtenido de centro de investigaciones medio ambientales.

Mossande., A. R. (2014). *Sistema de riego por goteo con bombeo solar fotovoltaico para el cultivo del tomate en el valle de Cavaco, provincia de Benguela, Angola*. La Habana.

NASA. (26 de march de 2008). *atmospheric science data center*. Obtenido de atmospheric science data center: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETSscreen/>

NASA. (s.f.). *Astmospheric science data center*. Obtenido de surface meteorology and solar energy.: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets%40nrcan.gc.ca&step=1&lat=5.016965&lon=-72.743470&submit=Submit>

- Pearce, J. M. (2002). Photovoltaics - a path to sustainable futures. *Science, Technology, and Society Program*The Pennsylvania State University, 13-3.
- Peralta, R. E. (2011). *La energía solar fotovoltaica como factor de desarrollo en zonas rurales de Colombia- carupana*. Bogota: Pontificia Universidad Javeriana.
- PEREZ, H. B. (OCT-DIC de 2010). EL CAMINO DE LA VIDA. (E. SOLAR, Entrevistador)
- Poza. (2007). *Sistemas de bombeo fotovoltaico*. Madrid.
- Poza, F. S. (2008). *Contribución al diseño de procedimientos de control de calidad para sistemas de bombeo fotovoltaico*. Madrid España: Universidad Politecnica de Madrid.
- Prabhu, R. (s.f.). *Mercom Capital Group*. Obtenido de Mercom Capital Group: <http://mercomcapital.com/global-solar-forecast-a-brighter-outlook-for-global-pv-installations1>
- Prado, R. C. (2008). *Diseño de un sistema eléctrico fotovoltaico para una comunidad aislada*. Costa Rica: Ciudad Universitaria Rodrigo Facio.
- Radiación solar. (2005). *Atlas de radiación solar en Colombia*. Bogota: SIMEC.
- REN21. (2012). *Renewables 2012 Global Status Report*.
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*. (2009). Obtenido de [http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014\\_Release\\_Spanish\\_website.pdf](http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_Release_Spanish_website.pdf)
- Roberth, P. (1997). *manual del ingeniero químico*. Bogota: Séptima edición : Mc Graw Hill.
- RODRIGUEZ, C. M. (2012). *INFORME SOBRE EL ESTADO DE LOS RECURSOS NATURALES Y EL MEDIO AMBIENTE*. Yopal: Gobernación de Casanare.
- Roper, D. (24 de agosto de 2011). *World Photovoltaic Energy (Energía mundial fotovoltaica)*. Obtenido de World Photovoltaic Energy: <http://www.roperld.com/science/worldphotovoltaicenergy.htm>
- SENER. (12 de JULIO de 2012). *SENER*. Obtenido de [http://www.sener.gob.mx/res/PE\\_y\\_DT/pub/2012/PER\\_2012-2026.pdf](http://www.sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2012/PER_2012-2026.pdf)

SENER, E. (12 de JULIO de 2013). *PROSPECTIVA DE ENERGIAS RENOVABLES*. Obtenido de PROSPECTIVA DE ENERGIAS RENOVABLES: [http://www.sener.gob.mx/res/PE\\_y\\_DT/pub/2012/PER\\_2012-2026.pdf](http://www.sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2012/PER_2012-2026.pdf)

*Solar industry analysts IHS*. (8 de octubre de 2014). Obtenido de Solar industry analysts IHS: [http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/ihs--454-gw-of-solar-to-be-added-globally-in-2014\\_100016732/#axzz3FfIMdUs5](http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/ihs--454-gw-of-solar-to-be-added-globally-in-2014_100016732/#axzz3FfIMdUs5)

Sudria., A. (s.f.). frase.

University of East Anglia. (2012). *Portal de Conocimientos sobre el Cambio Climático del Banco Mundial*. Unidad de Investigación del Clima.

UPME-Colombia. (s.f.). Energias renovables. *descripcion de la tecnologia y usos finales*. Bogota, Cundinamarca, Colombia.

Whitlock, R. (12 de febrero de 2013). *Energias Renovables*. Obtenido de Energias Renovables: <http://www.energias-renovables.com/articulo/la-fotovoltaica-instalada-en-el-mundo-supera-20130212>

Work, H. T.-f. (20 de febrero de 2008). *How Stuff Works (Como Funciona la Materia)*. Obtenido de How Stuff Works (Como Funciona la Materia): <http://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/thin-film-solar-cell.htm>

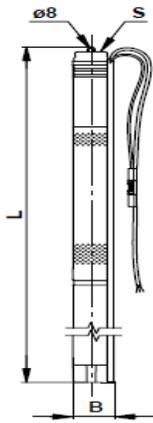
Yilman, A. F. (2007). *Diseño de un sistema de riego por medio de energia solar, a traves de paneles fotovoltaicos*. Universidad Austral de Chile: Universidad.

## 10.ANEXOS

### 10.1 ANEXO 1

A continuación se muestra la documentación relativa a la bomba instalada en el sistema.

#### Dimensiones y pesos



TM02 2209 3901

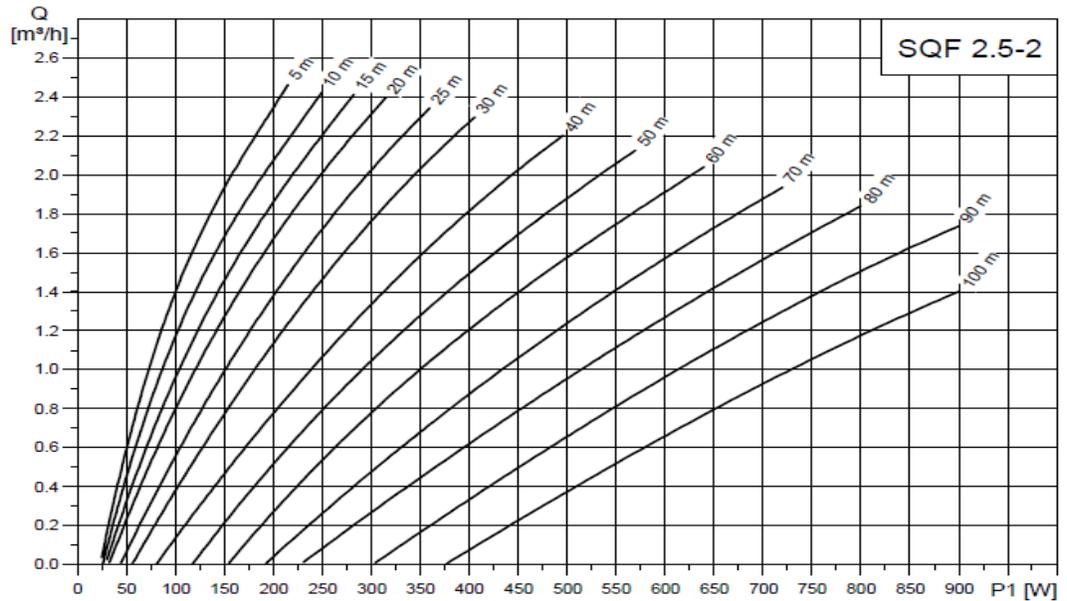
Tipo de bomba	Dimensiones [mm]			Peso neto [kg]*	Peso bruto [kg]*	Volumen de embarque [m³]*
	L	B	S			
SQF 0,6-2	1185 *	74	Rp 1¼	7,6	9,4	0,0242
SQF 0,6-2 N	1185 *	74	Rp 1¼	7,6	9,4	0,0242
SQF 0,6-3	1235 *	74	Rp 1¼	7,9	9,7	0,0242
SQF 0,6-3 N	1235 *	74	Rp 1¼	7,9	9,7	0,0242
SQF 1,2-2	1225 *	74	Rp 1¼	7,9	9,7	0,0242
SQF 1,2-2 N	1225 *	74	Rp 1¼	7,9	9,7	0,0242
SQF 2,5-2	1247 *	74	Rp 1¼	8,2	10,0	0,0242
SQF 2,5-2 N	1247 *	74	Rp 1¼	8,2	10,0	0,0242
SQF 3A-10	968	101	Rp 1¼	9,5	11,0	0,0282
SQF 3A-10 N	1012	101	Rp 1¼	11,1	12,6	0,0282
SQF 5A-3	821	101	Rp 1½	8,1	9,6	0,0282
SQF 5A-3 N	865	101	Rp 1½	9,3	10,8	0,0282
SQF 5A-6	884	101	Rp 1½	8,8	10,3	0,0282
SQF 5A-6 N	928	101	Rp 1½	10,2	11,7	0,0282
SQF 8A-3	927	101	Rp 2	9,5	11,0	0,0282
SQF 8A-3 N	927	101	Rp 2	9,5	11,0	0,0282
SQF 8A-5	1011	101	Rp 2	10,5	12,0	0,0282
SQF 8A-5 N	1011	101	Rp 2	10,5	12,0	0,0282
SQF 11A-3	982	101	Rp 2	10,9	12,4	0,0282
SQF 11A-3 N	982	101	Rp 2	10,9	12,4	0,0282

\* Bomba completa

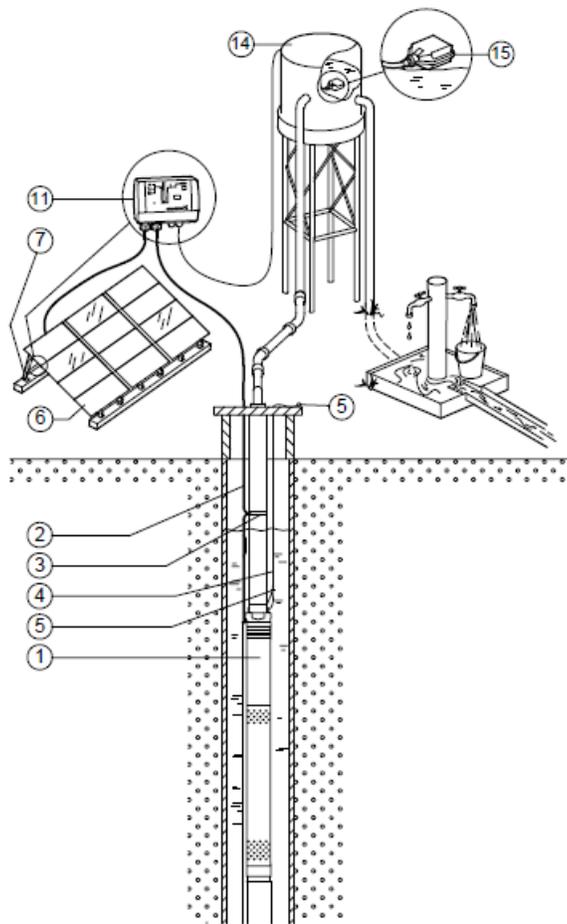
Activa

### CURVAS CARACTERÍSTICA DE LA BOMBA SQF 2,5-2.

#### SQF 2,5-2



## PUESTA A PUNTO DE UNA BOMBA GRUNDFOS



- 1 Bomba SQF
- 2 Cable de alimentación sumergible
- 3 Sujeciones de cable
- 4 Cable de refuerzo
- 5 Abrazadera del cable
- 6 Paneles solares
- 7 Estructura de soporte
- 11 unidad de control CU 200
- 14 Depósito de agua
- 15 Interruptor de nivel

Nota: Respecto al número de módulos solares necesarios, consultar la tabla de dimensionamiento.

## 10.2 ANEXO 2.

Software en Excel para determinar el diseño hidráulico del sistema de bombeo.

Datos de entrada		Tubería de succión		Sistema de bombeo	
$Q_B$ (m <sup>3</sup> /s)	0,0006			K	2517,85
$D_s$ (m)	0,076	$VT_{elev}$ (m <sup>3</sup> )	8,00	CDT (m)	23,32
$D_d$ (m)	0,025	$T_B$ (h)	3,70	NPSH <sub>d</sub> (m)	5,96
$v_s$ (m/s):	0,75	Re	104500,00	NPSH <sub>r</sub> (m)	0,0009
$v_d$ (m/s):	1.10	f	0,155	Ns	3,46
$\varepsilon$ (m)	0,015	hf <sub>s</sub> (m)	1,944	P <sub>B-m</sub> (kW)	0,02
$\gamma$ (m <sup>2</sup> /s)	0,0000008	h <sub>loc</sub> s (m)	0,031		
$L_s$ (m)	0,50				
$K_{loc}$	0,50	Tubería de descarga		Golpe de ariete	
$L_d$ (m)	5,00	$\lambda$	0,15	c (m/s)	1424,50
$H_d$ (m)	15,00	Re	23437,50	T <sub>p</sub> (s)	0,01
$H_t$ (m)	4,00	f	0,402	L <sub>c</sub> (m)	5,00
$\Delta Z_s$ (m)	0,30	hf <sub>d</sub> (m)	2,306	$\Delta p$ (m)	48,09
P <sub>v</sub> (m):	0,323	h <sub>locd</sub> (m)	0,014	P (m)	52,09
n (rpm)	1500,00				
$\eta$	0,65				
Ea (kg/cm <sup>2</sup> ):	20670,00				
E (kg/cm <sup>2</sup> ):	31400,00				
e (m)	0,0040				
P <sub>atm</sub> (m):	8,53				

### 10.3 ANEXO 3.

Software en Excel para determinar el diseño fotovoltaico del sistema de bombeo solar fotovoltaico.

Datos		Resultados	
$N_c$	1	$E_{CA}$ (Wh/d)	3409,412
$P$ (W) TABLA	900	$N_m$	9,4
$P_{pp}$ (W) TABLA	150	$N_m$	10
$V_N$ (V)	110	$P_{inv}$ (W)	4091,3
$V_M$ (V) TABLA	22		
$\eta_i$ (%)	85		
$\eta_d$ (%)	25		
$T_f$ (h)	3,22		
$I_M$ (A) TABLA	8,35		
HSP(h)	3,22		
$L_P$ (m) TABLA	1,48		
$\Phi$ (°)	5		
$\beta$ (°)	5		