

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

SISTEMA HÍBRIDO DE BOMBEO PARA COMUNIDADES REMOTAS

Carlos Mario Ochoa Bustamante

Felipe Álvarez Hincapié

Ingeniería Electromecánica

Director del trabajo de grado

Ing. Edwin Herlyt Lopera Mazo

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

2018

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

En el siguiente trabajo de grado se muestra un diseño aplicado a un sistema híbrido de bombeo para la comunidad indígena Wayuu en el departamento de la Guajira donde se beneficia una población carente del servicio de agua. El proyecto que se presenta a continuación busca aprovechar la extracción de agua de pozos a través de la implementación de energía eólica y la energía solar, con el fin de proveer agua potable a comunidades remotas que no cuenten con una red de acueducto ni con una red eléctrica. Este desarrollo es factible al realizar un análisis en la zona de interés donde se tienen en cuenta factores como el nivel de la radiación solar, la intensidad de los vientos y el estudio del suelo para localizar la posible fuente de agua subterránea. Una vez se obtengan condiciones favorables se procede a realizar un pozo en el suelo y se ubica una bomba para extraer el agua hasta la superficie. La energía eléctrica para la bomba es suministrada a través de paneles solares y una turbina eólica, por lo que se considera que esta propuesta es amigable con el medio ambiente y para el caso particular de Colombia estas fuentes de energía hasta la fecha son gratuitas.

La implementación de este sistema híbrido es una solución altamente viable en las áreas del país donde existan problemáticas sociales por la falta de garantía del gobierno al no proveer los recursos mínimos necesarios para la sociedad, además este sistema es una solución bastante atractiva en temas ambientales, sociales y económico gracias a su rápido retorno de inversión. Por consiguiente, esta tecnología es aceptada en la mayoría de los países por su gran contribución a la solución de este tipo de problemáticas.

Palabras clave: Sistema Híbrido, bomba sumergible, panel solar, turbina eólica, altura dinámica, caudal, cavitación, aguas subterráneas, potencia.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01- 22

RECONOCIMIENTOS

Al ingeniero Edwin Lopera por su gran apoyo, motivación y dedicación para la culminación del presente trabajo de grado, sus profundos análisis permitieron un excelente enfoque al objetivo del proyecto. A los profesores del Instituto Tecnológico Metropolitano que gracias a sus aportes y asesorías participaron efectivamente para el desarrollo de la propuesta.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

NPSH	Net Positive Suction Head
MCA	Metros de Columna de Agua.
GPM	Galones Por Minuto.
ASNM	Altura Sobre el Nivel del Mar.
RPM	Revoluciones Por Minuto.
ATM	Atmósfera.
Q	Caudal.
H	Cabeza dinámica.
W	Unidad de medida de la potencia Eléctrica.
PVC	Poli cloruro de vinilo.
Hes	Altura estática en la succión
HPFS	Altura por pérdidas por fricción en succión
HPVL	Altura equivalente a la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

SISTEMA HÍBRIDO DE BOMBEO PARA COMUNIDADES REMOTAS.	1
1. INTRODUCCIÓN	9
2. OBJETIVOS	10
3. MARCO TEÓRICO	11
3.1. Ciclo Hidrológico	11
3.2. Aguas subterráneas	12
3.3. Acuífero	13
3.3.1. Acuíferos libres.....	13
3.3.2. Acuíferos confinados.....	13
3.3.3. Acuíferos semiconfinados	14
3.4. Pozo	14
3.4.1. Rendimiento de un pozo	14
3.4.1.1. El rendimiento seguro	14
3.4.1.2. El rendimiento sostenido permisivo	15
3.4.1.3. El rendimiento máximo sostenido	15
3.5. Bombas	15
3.5.1. Presión.....	16
3.5.2. Caudal.....	17
3.5.3. Velocidad en fluidos	17
3.5.4. Cabeza de líquido	17
3.5.5. Presión atmosférica.....	18
3.5.6. Altura estática	19
3.5.7. Pérdidas.....	20
3.5.8. Altura dinámica	23
3.5.9. Longitud equivalente.....	23
3.5.10. Cabeza neta positiva de succión	23

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.5.11. Curvas hidráulicas	25
3.5.12. Potencia en bombas.....	26
3.5.13. Principio de Funcionamiento de una bomba centrífuga.....	27
3.5.14. Partes de una bomba centrífuga	28
3.5.14.1. Estáticas.....	28
3.5.14.2. Dinámicas	29
3.6. Bombas para pozos.....	30
3.7. Energía solar	31
3.7.1. Células solares	32
3.7.1.1. Células solares fotovoltaicas monocristalinas.....	33
3.7.1.2. Células solares fotovoltaicas policristalinas	33
3.7.1.3. Células solares fotovoltaicas de capa fina.....	33
3.7.2. Parámetros fundamentales para el cálculo de un panel solar	34
3.7.2.1. Potencia máxima (Pmax).....	34
3.7.2.2. Tensión máxima (Vmax).....	34
3.7.2.3. Corriente máxima (Imax).....	34
3.7.3. Ubicación de panel solar	34
3.7.4. Horas pico sol (HPS)	35
3.7.5. Aplicaciones de la energía solar	35
3.7.6. Energía solar en Colombia.....	36
3.7.7. Cálculo de paneles solares	39
3.8. Energía eólica.....	39
3.8.1. Fenómeno eólico.....	39
3.8.2. Turbinas eólicas.....	40
3.8.3. Componentes de una turbina eólica	40
3.8.3.1. La base.....	40
3.8.3.2. La torre	41
3.8.3.3. Palas	41
3.8.3.4. Rotor.....	41
3.8.3.5. Góndola	41

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.8.3.6. La caja de cambios	41
3.8.3.7. Generador	41
3.8.3.8. Sistema de frenado	42
3.8.3.9. Sistema de control	42
3.8.4. Tipos de turbinas eólicas.....	42
3.8.4.1. Turbinas de eje horizontal.....	43
3.8.4.2. Aerogenerador de eje vertical	44
3.8.5. Rendimiento de la turbina eólica	44
3.8.6. Energía Eólica en Colombia	45
4. METODOLOGÍA.....	48
4.1 Sitio de instalación.....	48
4.2 Pozo	50
4.3 Selección de bomba hidráulica.....	51
4.3.1. Presión o Cabeza hidráulica	51
4.3.2. Caudal requerido.....	52
4.3.3. Tanque de almacenamiento.....	53
4.3.4. Diámetro de la tubería de descarga.....	53
4.3.5. Cálculo de altura dinámica total	54
4.3.6. Cálculo de potencia demandada de la bomba.....	57
4.3.7. Selección de la bomba.....	57
4.3.8. Curva hidráulica.....	59
4.3.7.1. Aplicación	61
4.3.7.2. Usos.....	62
4.3.7.3. Características y ventajas	62
4.3.7.4. Especificaciones	62
4.4. Cálculo potencia de turbina eólica	65
4.4.1 Especificaciones técnicas	67
4.4.2 Curva de potencia	67
4.5. Cálculo de paneles solares.....	68
4.6. Instrumentación	70

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.6.1. Controlador IO102.....	71
4.6.1.1. Especificaciones técnicas	71
4.6.2. Controlador CU 200.....	73
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	75
6. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	84
REFERENCIAS	86

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

Un sistema híbrido de bombeo de agua se compone de diferentes dispositivos eléctricos y mecánicos que permiten aprovechar distintos tipos de energías renovables para el suministro eléctrico de un proceso y dar un servicio de agua a una población específica. Las zonas seleccionadas para este tipo de sistemas generalmente no cuentan con una fuente de agua como un río o un arroyo, por lo que se debe localizar una en forma de aguas subterráneas a través de la implementación de pozos.

El bombeo de agua mediante energía solar y energía eólica (sistema híbrido) es una opción interesante para el riego y el abastecimiento de agua potable en vista del aumento de los costos del diésel y la ausencia de energía eléctrica de los operadores de red en Colombia en algunas zonas de bajos recursos. En promedio una persona consume 3.8 metros cúbicos de agua mensualmente, según cifras de Empresas Públicas de Medellín, y la Contraloría General de la República recomienda no superar los 4.5 metros cúbicos de agua mensuales por persona, por lo tanto, la demanda de agua en una comunidad es altamente necesaria y debe ser suplida aún en casos extremos (Empresas Públicas de Medellín, 2018).

En la actualidad, las bombas de agua generalmente son utilizadas para esta aplicación en Suramérica. Con el ánimo de satisfacer las necesidades de zonas que no cuentan con los servicios básicos necesarios como agua potable y energía eléctrica, esta opción resulta llamativa debido a que es una solución limpia y amigable con el medio ambiente. Para garantizar la efectividad y viabilidad de un sistema híbrido de bombeo de agua subterránea se deben tener en cuenta diversos factores, principalmente la presencia de agua subterránea en la zona, además, que el sitio propuesto cuente con los índices de radiación solar y de velocidad del viento adecuadas para garantizar la confiabilidad del híbrido.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. OBJETIVOS

General.

Diseñar un sistema de bombeo híbrido totalmente dependiente de recursos naturales renovables para brindar agua a comunidades remotas del país, ubicadas en zonas de difícil acceso, en las que este recurso vital escasea y en donde el suministro eléctrico es inexistente o poco fiable.

Específicos.

Estudiar una zona del país donde actualmente posean problemas con los suministros de agua potable y de energía eléctrica para la comunidad.

Analizar el estudio topográfico para el conocimiento de variables tales como: velocidad del viento, radiación solar de la zona y fuentes naturales de agua subterráneas con el fin de conocer la viabilidad del sistema híbrido.

Dimensionar el sistema de bombeo híbrido respetando las recomendaciones entregadas por el análisis topográfico.

Implementar un sistema de bombeo híbrido utilizando energías renovables y acuíferos para el suministro de agua potable en la zona de estudio.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. MARCO TEÓRICO

Los sistemas híbridos de bombeo generalmente se componen de un conjunto de dispositivos en los cuales cada elemento se dispone para una única función. Los elementos por utilizar son turbinas eólicas, paneles solares, tuberías para la conducción del fluido, tableros de control y potencia y bombas electromecánicas. Para un mejor entendimiento, en el presente capítulo se definirán detalles técnicos de cada uno de estos componentes y las características de la energía solar y eólica que se aprovechan en estas técnicas.

Todo análisis de viabilidad parte de la localidad en la que se desea realizar el trabajo; de allí depende la continuidad del proyecto, ya que la ubicación geográfica es primordial para conocer valores como la radiación solar y la velocidad del viento, y realizar estudios del suelo para hallar las posibles fuentes de agua subterráneas. Pueden ocurrir casos en las que se presenten condiciones favorables de radiación solar y de velocidad del viento, pero ambas condiciones dependerán de un análisis topográfico para encontrar la posible fuente de agua. Cabe resaltar que esta última condición es la más importante ya que el objetivo del proyecto es brindar un servicio de agua a comunidades remotas que no cuentan con el fácil acceso a este recurso vital. Es por tal razón que se inicia con la definición de aguas subterráneas.

3.1. Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico es la continuación de etapas que atraviesa el agua al pasar de la tierra a la atmósfera y retornar nuevamente a la tierra. El ciclo va desde la evaporación del agua del suelo, del mar o de las aguas continentales, para luego ser condensada y así formar lo que conocemos como nubes, después se presenta la precipitación y finalmente la acumulación en el suelo de masas de agua para comenzar otro ciclo en la reevaporación, tal como se observa en la Figura 1.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 1. Ciclo hidrológico (Grand, 2018).

El ciclo hidrológico involucra un proceso de transporte recirculatorio indefinido que se debe principalmente a dos causas: la primera, el sol, ya que proporciona la energía para elevar el agua; y la segunda, la gravedad terrestre, que hace descender el agua condensada (Ordoñez, 2012).

3.2. Aguas subterráneas

El uso de agua subterránea se ha incrementado en el mundo y cada vez adquiere mayor atención e importancia debido al agotamiento o la no existencia de fuentes superficiales en algunas regiones. Se estima que más de la mitad de la población mundial depende del agua subterránea como fuente de agua potable. Grandes ciudades como Bangkok, Mombasa, Buenos Aires, Miami y Calcuta usan el agua subterránea para el abastecimiento de su población (Otálvaro, 1999)

El agua subterránea se filtra a través de grietas y poros de las rocas que yacen debajo de la superficie de la tierra, acumulándose en las capas arenosas del subsuelo. El agua se almacena y mueve en las formaciones geológicas que tienen poros o vacíos, tal como se muestra en la Figura 2 (Instituto Colombiano de Geología y Minería, 2011).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

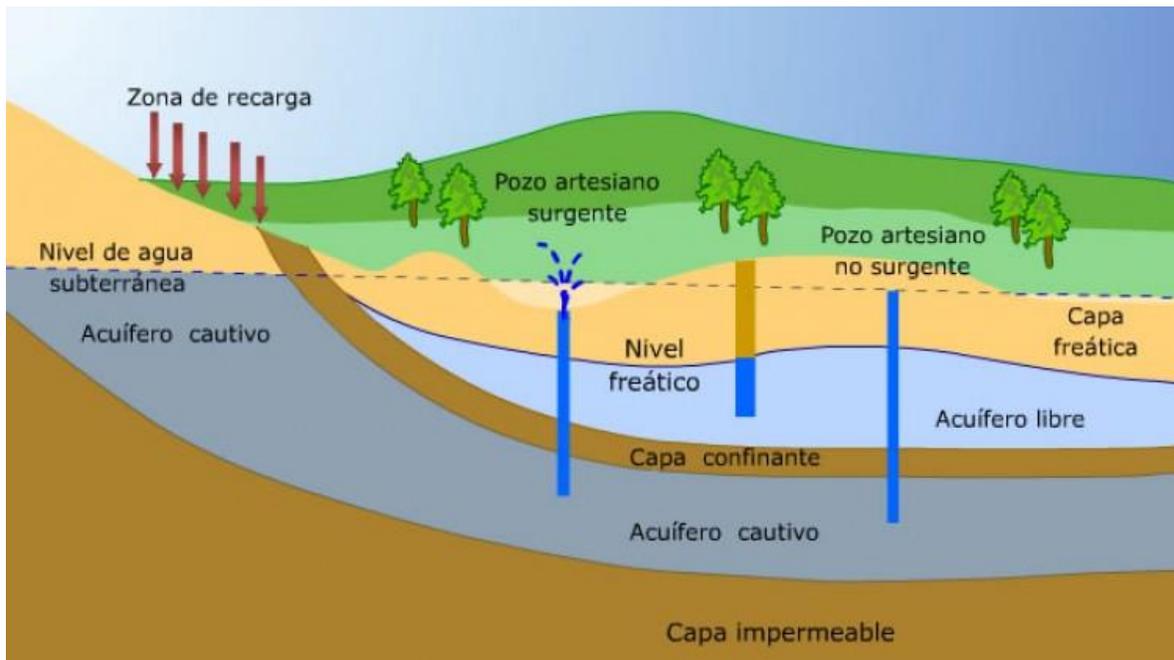


Figura 2. Formaciones geológicas (Cuyo, 2016).

3.3. Acuífero

Un acuífero es un volumen subterráneo de roca y arena que contiene agua. El agua subterránea que se halla almacenada en los acuíferos es una parte importante del ciclo hidrológico. Se han realizado estudios que permiten calcular que aproximadamente el 30 % del caudal de superficie proviene de fuentes de agua subterránea (Ordoñez, 2012) (ver la Figura 2).

Los acuíferos se clasifican en:

3.3.1. Acuíferos libres: son aquellos en los que el nivel de agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable, es decir, liberan agua procedente del drenaje de sus poros.

3.3.2. Acuíferos confinados: son aquellos cubiertos por una capa impermeable confinante. El nivel de agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo de la formación acuífera. El agua que ceden procede de la expansión del agua y de la descompresión de la estructura permeable vertical, cuando se produce la depresión en el acuífero. También se les denomina acuíferos cautivos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.3.3. Acuíferos semiconfinados: se pueden considerar un caso particular de los acuíferos cautivos, en los que muro, techo o ambos no son totalmente impermeables, sino que permiten una circulación vertical del agua (Ordoñez, 2012).

3.4. Pozo

Un pozo es un agujero, excavación o túnel vertical que perfora la tierra (Figura 3) hasta una profundidad suficiente para alcanzar una reserva de agua subterránea del nivel freático o fluidos como el petróleo. Generalmente de forma cilíndrica, se suele tomar la precaución de asegurar sus paredes con ladrillo, piedra, cemento o madera, para evitar su deterioro y derrumbe.

La presencia de un pozo con suficiente agua subterránea para abastecer las necesidades existentes es primordial para la implementación de esta propuesta, esto se precisa mediante un estudio geológico de suelos, el cual determina el lugar exacto, profundidad y aforo del pozo.

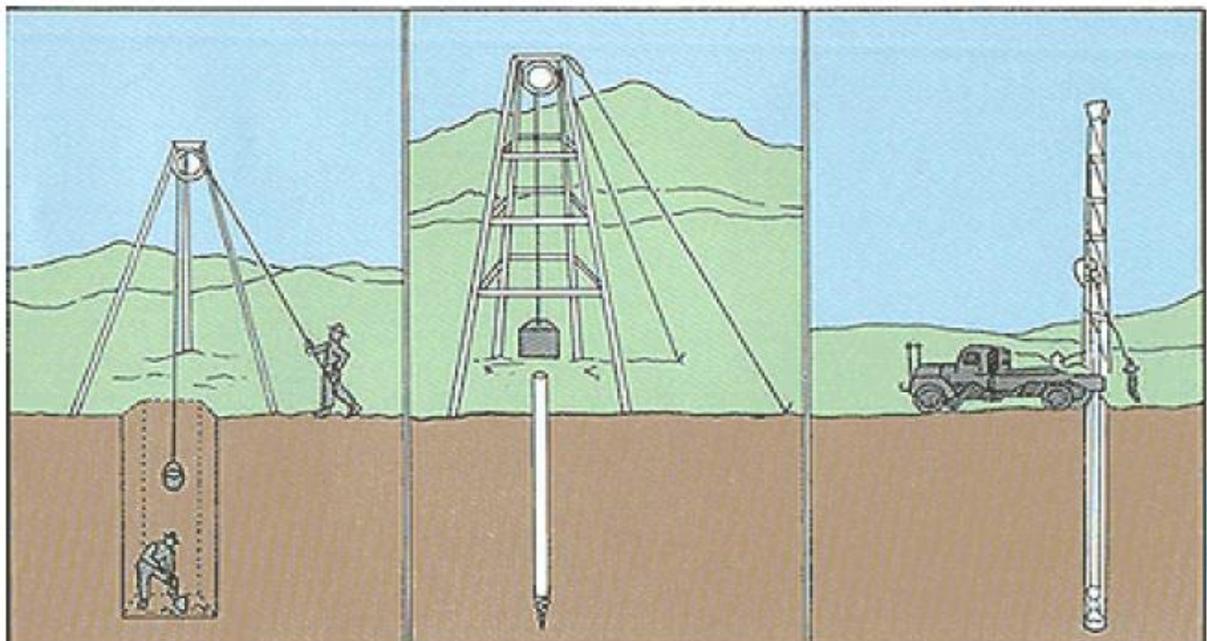


Figura 3. Construcción de un Pozo (excavación, propulsión, perforación) (Ordoñez, 2012)

3.4.1. Rendimiento de un pozo

Determinar el rendimiento del pozo es importante, ya que también se determinará el impacto que el bombeo tendrá sobre el acuífero. Las siguientes son definiciones de diferentes tipos de rendimiento (Martinez & Lopez, 1984):

3.4.1.1. El rendimiento seguro es la cantidad de agua que se puede retirar anualmente sin el agotamiento final del acuífero.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.4.1.2. El rendimiento sostenido permisivo es la tasa máxima a la que el agua puede ser extraída de un acuífero de forma continua sin afectar la estructura del pozo.

3.4.1.3. El rendimiento máximo sostenido es la tasa máxima a la que se puede retirar el agua del acuífero de forma continua.

Una vez se obtenga la caracterización del pozo, se procede a la extracción del agua. Para extraer el agua subterránea de los acuíferos es necesario construir una captación, es decir, una instalación que permita poner a disposición del usuario el agua contenida en los pozos. Los geólogos realizan una perforación del suelo que por lo regular se hace usando una broca en forma cilíndrica con un diámetro entre 2 y 16 pulgadas. Esta perforación se reviste de tubería metálica o PVC mediante hincados de tubería o perforación con taladros y se dotan de sistemas de extracción de bombeo (Ordoñez, 2012).

3.5. Bombas

Una bomba es un aparato electromecánico cuya única función es adicionarle energía a un fluido para que pueda realizar un trabajo. Los fluidos pueden ser compresibles o incompresibles. El fluido compresible es aquel cuya densidad cambia cuando es sometido a una fuerza, como ocurre, por ejemplo, con los gases y el aire, y un fluido incompresible es aquel cuya densidad no cambia así este sea sometido a fuerzas como ocurre, por ejemplo, con el agua, con esto se puede decir que las bombas para agua pueden adicionarle energía únicamente a fluidos incompresibles.

Las bombas pueden clasificarse en varios tipos como se observa en la Figura 4 y dicha clasificación depende de su aplicación, tipos de fluido que se desea emplear y tipo de accionamiento motriz que puede ser accionada por motor diésel, gasolina o eléctrico; pero se puede decir que la categorización más ajustada está dada a la construcción en sí de las bombas, ya que esta fabricación las clasifica por la forma en como transfiere el fluido en su interior, desde la succión hasta la descarga.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

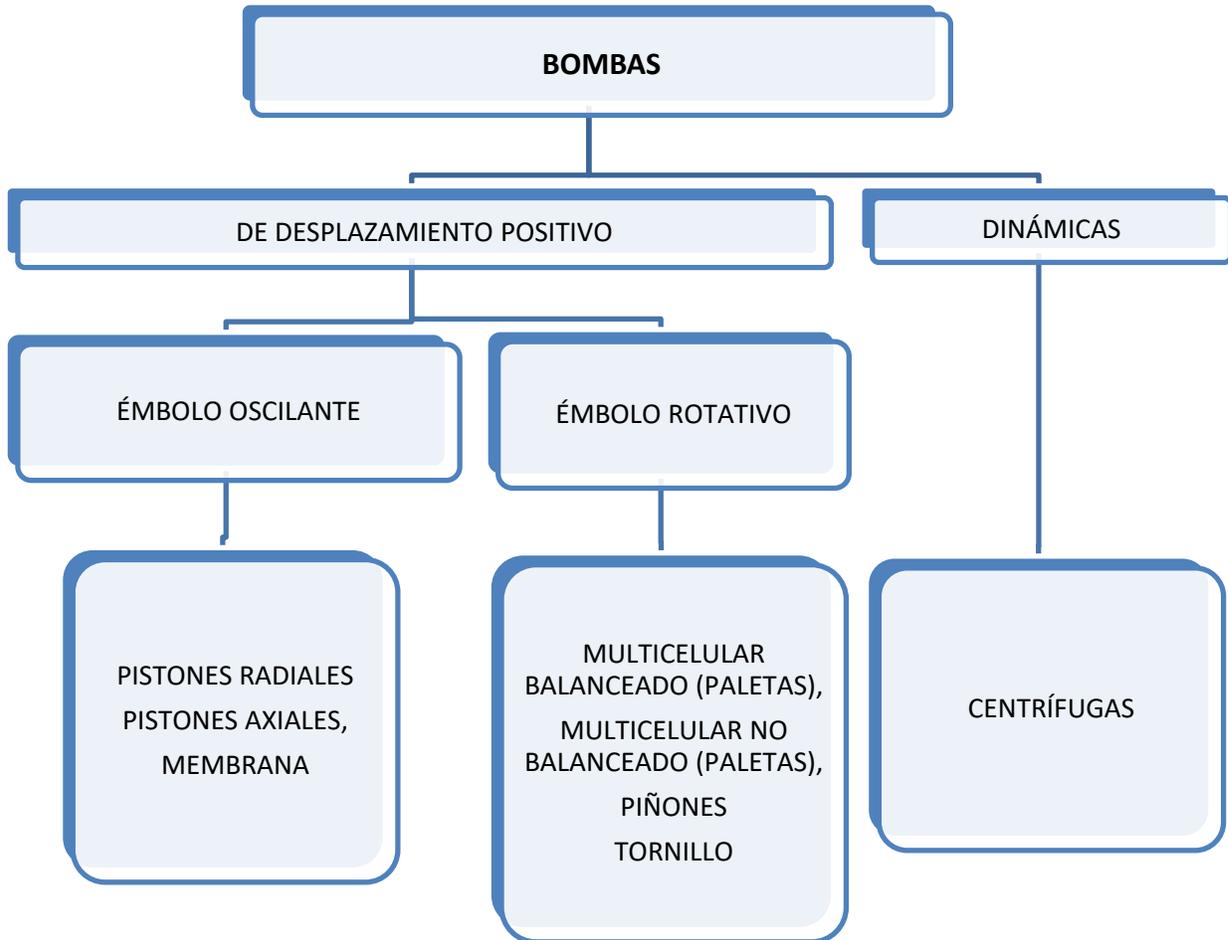


Figura 4. Clasificación de las bombas según su construcción. Fuente: autores.

El presente trabajo se concentra en el estudio de las bombas centrífugas y sus derivaciones como las bombas sumergibles de múltiples etapas. para entender el principio de funcionamiento de las bombas centrífugas primero se deben conocer las siguientes definiciones:

3.5.1. Presión

La presión es una fuerza ejercida sobre unidad de área, dicha fuerza puede darse perpendicular al área que se desea analizar. Para el tema de bombeo o puede darse en diferentes direcciones como en el caso de materia líquida, las unidades de medida de la presión son:

$$\text{Presión} = \frac{\text{fuerza}}{\text{área}}$$

Unidades en el Sistema Métrico: $\frac{Kgf}{cm^2}$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Unidades en el Sistema Inglés: $\frac{lb}{in^2}$ (*psi*)

3.5.2. Caudal

Es la cantidad de líquido movilizado en la unidad de tiempo, o también es el volumen de líquido movilizado.

$$\text{Caudal } Q = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}}$$

Unidades en el Sistema Internacional : $\frac{m^3}{s}$

Otras unidades comunes de caudal para la selección de bombas son galones por minuto, metro cúbico por hora o litros por segundo.

3.5.3. Velocidad en fluidos

La velocidad es una distancia recorrida por unidad de tiempo, también la relación entre el caudal de un líquido que pasa a través de determinada área.

$$\text{Velocidad } V = \frac{\text{Caudal}}{\text{Área}}$$

Unidades en el Sistema Internacional : $\frac{\frac{m^3}{s}}{m^2} = \frac{m}{s}$

3.5.4. Cabeza de líquido

Es la altura que tiene una columna determinada de líquido. El peso del líquido ejerce una fuerza en la base. Como se aprecia en la Figura 5 ese peso está definido por la densidad del fluido y la gravedad y la altura H de la columna, así que para un área definida solamente le corresponde el peso de la columna que se encuentra sobre ella, es decir no depende de la cantidad de líquido si no solo de su altura de este.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

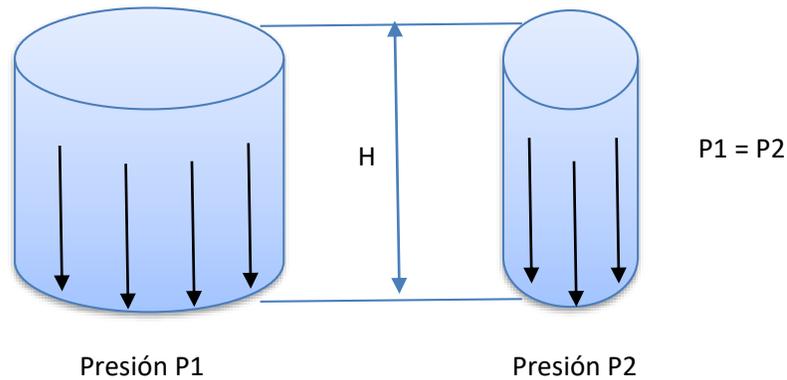


Figura 5. Cabeza de líquido para un mismo fluido. Fuente: autores.

3.5.5. Presión atmosférica

Se puede decir que el peso de la columna de aire sobre un área determinada también se puede hacer equivalente al peso de una columna de líquido sobre una misma área. La presión atmosférica varía dependiendo del lugar de la tierra donde se esté midiendo a mayor altura sobre el nivel del mar menor es la presión atmosférica. Ver La Figura 6.

$$P_{\text{atm}} = \frac{\text{Peso}}{\text{Área}}$$

Presión atmosférica a nivel del mar:

$$P_{\text{atm}} = 14.7 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \text{ o } 1.033 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

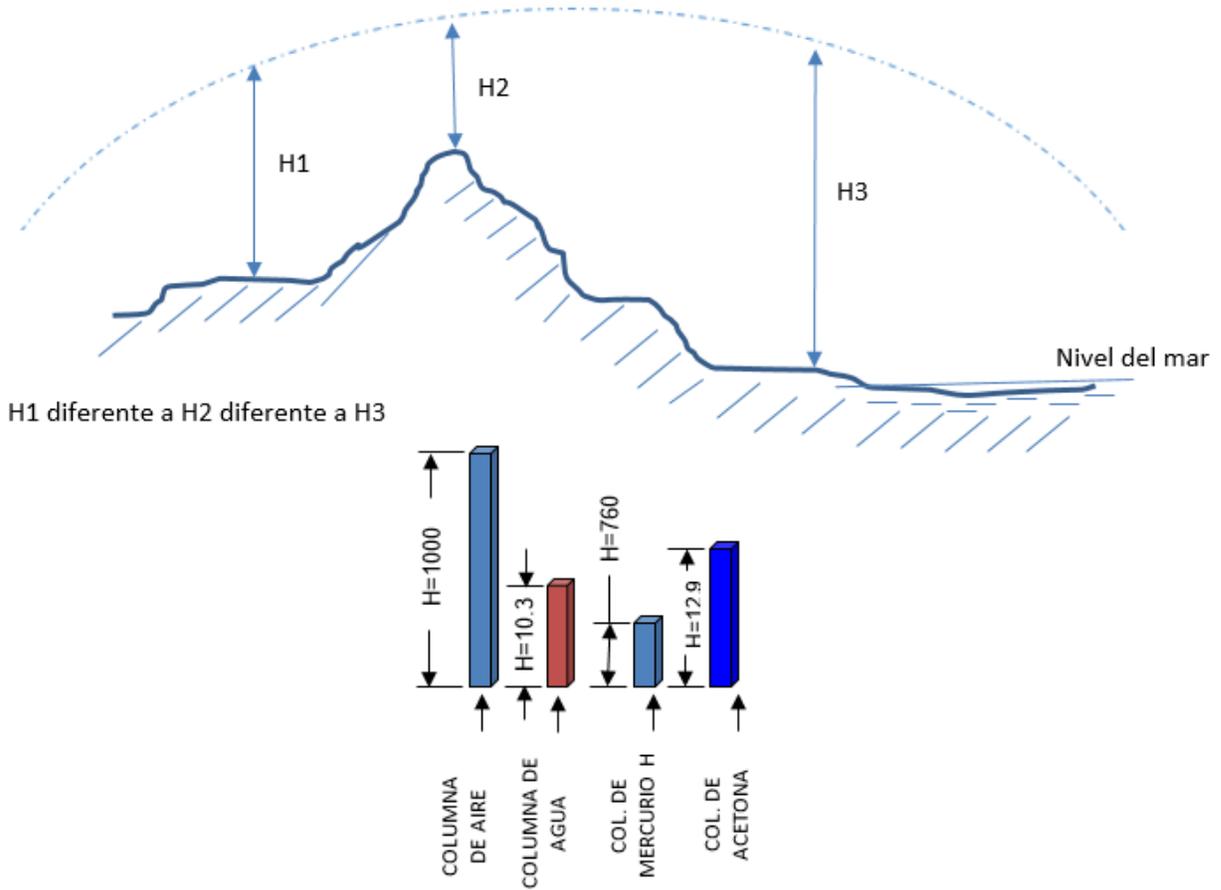
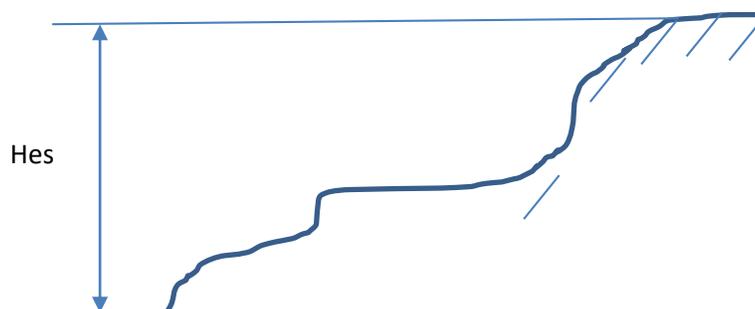


Figura 6. Presión atmosférica a diferentes alturas. Fuente: autores.

3.5.6. Altura estática

Son las distancias verticales que hay de un determinado sitio a otro, tal como se observa en la Figura 7.



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 7. Altura estática. Fuente: autores.

En un sistema de bombeo existen alturas estáticas de succión y alturas estáticas de descarga (ver la Figura 8).

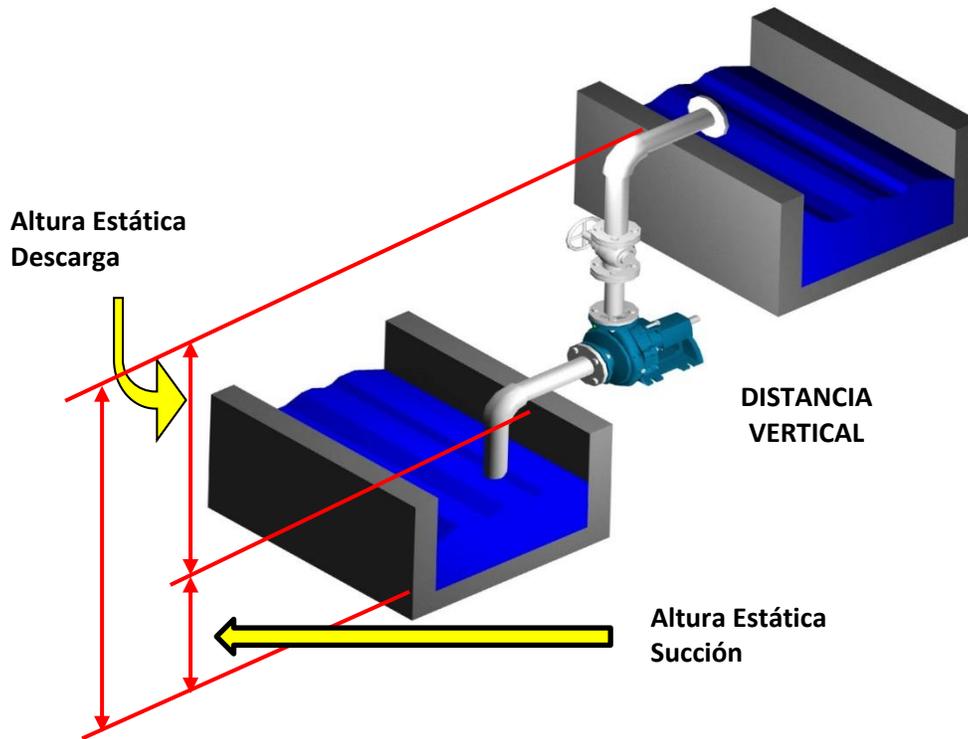


Figura 8. Explicación de alturas en una bomba centrífuga. Fuente: autores.

3.5.7. Pérdidas

Las pérdidas por fricción son todas aquellas resistencias que se generan en un conducto cuando un líquido fluye a través de este, dichas resistencias también dependen del tipo de material usado en la tubería y su diámetro de esta, además a medida que se agregan accesorios sanitarios en la instalación se aumentan las pérdidas por fricción, a continuación, se muestra la Tabla 1 para conocer algunos valores de estas pérdidas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACCESORIO	LONGITUD EQUIVALENTE EN PIES VERSUS DIAMETRO DEL TUBO										
	1"	1.1/4"	1.1/2"	2"	3"	4"	5"	6"	8"	10"	12"

REGISTROS	27	35	45	60	80	110					
CHEQUES	7	9	11	14	19	25	35	40	55	65	80
VALV. PIE (*)	9	11	14	17	24	34	44	50	69	80	100
CODO 90°	2.5	3	4.5	5.5	8	11	13	17	20	28	32
CODO 45°	1.5	1.8	2	2.5	3.5	5	6.5	7.5	10	13	15
CODO "U"	6	8	10	13	17	24	30	37	50	60	75

Tabla 1. Longitud equivalente de accesorios en ft en relación al diámetro (Ignacio Gomez IHM SAS, 2000).

No solamente del número de accesorios influye en las pérdidas, sino también el material de la tubería debido a su rugosidad. Materiales como el PVC, ofrecen menos pérdidas, aproximadamente la mitad de las pérdidas de los tubos de acero, esto se debe a que el porcentaje de rugosidad interno de la tubería es menor en el PVC y permite con mayor facilidad la conducción del fluido. En la Tabla 2 se puede apreciar como varía el porcentaje de pérdidas en diferentes diámetros de tuberías PVC.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Pérdida de Presión

Según la ecuación de Hazen & Williams $H_f = 10 \cdot 64 \cdot Q^{1.852} / C^{1.852} \cdot D^{4.87}$ L: longitud igual a 1m Q: Caudal en l/s D: diámetro interno en mm Cfw: Coeficiente de Hazen Williams para el PVC, 150

Q l/s	Pérdidas por Fricción m/m										Pérdidas por Fricción m/m											
	1/2"		3/4"		1"		1.1/4"		1.1/2"		2"		2.1/2"		3"		4"		6"			
	RDE	RDE	RDE	RDE	RDE	RDE	RDE	RDE	RDE	RDE	RDE	RDE	RDE	RDE	RDE	RDE	RDE	RDE	RDE	RDE		
0,1	0,0188	0,0184	0,0050	0,0034	0,0014	0,0010																
0,2	0,0679	0,0663	0,0180	0,0122	0,0048	0,0037																
0,3	0,1437	0,1404	0,0380	0,0257	0,0104	0,0078	0,0025	0,0022														
0,4	0,2448	0,2391	0,0648	0,0438	0,0177	0,0133	0,0043	0,0033														
0,5	0,3698	0,3613	0,0979	0,0662	0,0267	0,0201	0,0064	0,0047														
0,6	0,5182	0,5062	0,1371	0,0928	0,0374	0,0281	0,0090	0,0062	0,0021	0,0019												
0,7	0,6892	0,6733	0,1824	0,1235	0,0497	0,0374	0,0120	0,0079	0,0027	0,0024												
0,8	0,8823	0,8619	0,2335	0,1581	0,0637	0,0479	0,0154	0,0099	0,0033	0,0030												
0,9	1,0972	1,0718	0,2904	0,1965	0,0792	0,0595	0,0191	0,0120	0,0041	0,0037												
1,0	1,3333	1,3024	0,3529	0,2388	0,0962	0,0723	0,0232	0,0143	0,0048	0,0044	0,0019	0,0017										
1,1	1,5904	1,5536	0,4209	0,2849	0,1148	0,0863	0,0277	0,0168	0,0057	0,0051	0,0022	0,0020										
1,2	1,8681	1,8249	0,4944	0,3346	0,1348	0,1013	0,0325	0,0195	0,0066	0,0060	0,0025	0,0023										
1,3			0,5733	0,3890	0,1563	0,1175	0,0377	0,0223	0,0075	0,0068	0,0030	0,0027										
1,4			0,6576	0,4451	0,1793	0,1348	0,0432	0,0254	0,0086	0,0078	0,0034	0,0031										
1,5			0,7471	0,5057	0,2037	0,1531	0,0491	0,0286	0,0097	0,0088	0,0038	0,0034	0,0015	0,0013	0,0012	0,0003						
1,6			0,8418	0,5688	0,2295	0,1725	0,0554	0,0320	0,0108	0,0098	0,0043	0,0039	0,0016	0,0015	0,0014	0,0004						
1,7			0,9417	0,6374	0,2568	0,1930	0,0619	0,0356	0,0120	0,0109	0,0047	0,0043	0,0018	0,0017	0,0015	0,0004						
1,8			1,0468	0,7085	0,2854	0,2145	0,0688	0,0393	0,0133	0,0120	0,0052	0,0047	0,0020	0,0018	0,0017	0,0005						
1,9			1,1569	0,7830	0,3155	0,2371	0,0761	0,0432	0,0146	0,0132	0,0058	0,0052	0,0022	0,0020	0,0018	0,0005						
2,0			1,2720	0,8610	0,3469	0,2607	0,0836	0,0475	0,0174	0,0158	0,0069	0,0062	0,0025	0,0024	0,0022	0,0006						
2,2					0,4137	0,3110	0,0998	0,0605	0,0205	0,0185	0,0081	0,0073	0,0031	0,0029	0,0026	0,0007						
2,4					0,4860	0,3653	0,1172	0,0702	0,0237	0,0215	0,0094	0,0085	0,0036	0,0033	0,0030	0,0008	0,0011	0,0010	0,0009	0,0008		
2,6					0,5636	0,4236	0,1359	0,0805	0,0272	0,0246	0,0107	0,0097	0,0041	0,0037	0,0034	0,0009	0,0012	0,0011	0,0010	0,0009		
2,8					0,6464	0,4858	0,1559	0,0915	0,0309	0,0280	0,0122	0,0110	0,0047	0,0042	0,0039	0,0011	0,0014	0,0012	0,0011	0,0011		
3,0					0,7344	0,5519	0,1771	0,1017	0,0341	0,0312	0,0162	0,0147	0,0052	0,0047	0,0042	0,0014	0,0018	0,0017	0,0015	0,0014		
3,5					0,9767	0,7341	0,2355	0,1358	0,0526	0,0477	0,0208	0,0188	0,0080	0,0072	0,0067	0,0018	0,0023	0,0021	0,0020	0,0018		
4,0							0,3015	0,1937	0,0655	0,0593	0,0258	0,0233	0,0098	0,0090	0,0083	0,0023	0,0029	0,0026	0,0024	0,0023		
4,5							0,3749	0,2354	0,0795	0,0720	0,0314	0,0294	0,0120	0,0109	0,0101	0,0028	0,0035	0,0032	0,0030	0,0028		
5,0							0,4556	0,2898	0,0949	0,0859	0,0374	0,0338	0,0144	0,0130	0,0120	0,0033	0,0042	0,0038	0,0035	0,0033		
5,5							0,5435	0,3298	0,1114	0,1010	0,0440	0,0397	0,0169	0,0153	0,0141	0,0039	0,0050	0,0045	0,0041	0,0039		
6,0							0,6384	0,3824	0,1292	0,1171	0,0510	0,0461	0,0196	0,0178	0,0164	0,0045	0,0057	0,0052	0,0048	0,0045	0,0009	0,0008
6,5								0,4386	0,1482	0,1343	0,0685	0,0629	0,0224	0,0204	0,0188	0,0052	0,0066	0,0060	0,0055	0,0052	0,0010	0,0009
7,0								0,4984	0,1694	0,1525	0,0664	0,0601	0,0255	0,0231	0,0213	0,0059	0,0075	0,0068	0,0063	0,0059	0,0011	0,0010
7,5									0,1898	0,1719	0,0748	0,0677	0,0287	0,0261	0,0240	0,0066	0,0084	0,0077	0,0071	0,0066	0,0013	0,0012
8,0									0,2123	0,1923	0,0837	0,0757	0,0321	0,0292	0,0269	0,0074	0,0094	0,0086	0,0079	0,0074	0,0014	0,0013
8,5									0,2360	0,2137	0,0931	0,0842	0,0357	0,0324	0,0298	0,0082	0,0105	0,0095	0,0088	0,0082	0,0016	0,0014
9,0									0,2608	0,2362	0,1029	0,0930	0,0385	0,0358	0,0330	0,0091	0,0116	0,0105	0,0097	0,0091	0,0018	0,0016
9,5									0,2867	0,2597	0,1131	0,1023	0,0434	0,0394	0,0363	0,0100	0,0128	0,0116	0,0107	0,0100	0,0019	0,0018
10,0									0,3120	0,2838	0,1249	0,1120	0,0483	0,0440	0,0403	0,0119	0,0152	0,0138	0,0127	0,0119	0,0023	0,0021
11,0									0,4018	0,3639	0,1585	0,1433	0,0608	0,0552	0,0509	0,0140	0,0179	0,0162	0,0150	0,0140	0,0027	0,0025
12,0									0,4837	0,4362	0,1962	0,1780	0,0690	0,0620	0,0570	0,0162	0,0207	0,0188	0,0173	0,0162	0,0032	0,0029
13,0									0,5677	0,5190	0,2374	0,2160	0,0777	0,0718	0,0658	0,0186	0,0238	0,0216	0,0199	0,0186	0,0036	0,0033
14,0									0,6534	0,6039	0,2819	0,2580	0,0874	0,0804	0,0734	0,0212	0,0270	0,0245	0,0226	0,0212	0,0041	0,0037
15,0									0,7398	0,6894	0,3294	0,3030	0,0979	0,0900	0,0820	0,0236	0,0300	0,0276	0,0255	0,0239	0,0046	0,0042
16,0									0,8269	0,7759	0,3794	0,3510	0,1083	0,1000	0,0915	0,0256	0,0340	0,0309	0,0285	0,0267	0,0052	0,0047
17,0									0,9144	0,8624	0,4309	0,4010	0,1194	0,1105	0,1015	0,0276	0,0370	0,0339	0,0317	0,0297	0,0058	0,0052
18,0									1,0023	0,9493	0,4834	0,4520	0,1309	0,1215	0,1120	0,0296	0,0460	0,0429	0,0407	0,0387	0,0064	0,0058
19,0									1,0904	1,0364	0,5374	0,5050	0,1424	0,1325	0,1225	0,0316	0,0510	0,0475	0,0453	0,0431	0,0070	0,0063
20,0									1,1787	1,1237	0,5924	0,5590	0,1544	0,1440	0,1335	0,0336	0,0560	0,0525	0,0500	0,0478	0,0076	0,0070
22,0									1,3564	1,2994	0,6964	0,6620	0,1764	0,1655	0,1545	0,0356	0,0640	0,0605	0,0580	0,0558	0,0089	0,0083
24,0									1,5341	1,4761	0,7994	0,7640	0,1984	0,1870	0,1755	0,0376	0,0720	0,0685	0,0660	0,0638	0,0104	0,0103
26,0									1,7118	1,6528	0,9024	0,8660	0,2204	0,2085	0,1965	0,0396	0,0800	0,0765	0,0740	0,0718	0,0118	0,0118
28,0									1,8895	1,8295	1,0054	0,9690	0,2424	0,2300	0,2175	0,0416	0,0880	0,0845	0,0820	0,0798	0,0134	0,0134
30,0									2,0672	2,0062	1,1084	1,0710	0,2644	0,2515	0,2385	0,0436	0,0960	0,0925	0,0900	0,0878	0,0149	0,0149
35,0									2,6449	2,5829	1,4114	1,3730	0,3164	0,3025	0,2885	0,0486	0,1120	0,1085	0,1060	0,1038	0,0179	0,0179
40,0									3,2226	3,1596	1,7144	1,6750	0,3684	0,3535	0,3385	0,0536	0,1260	0,1225	0,1200	0,1178	0,0204	0,0204
50,0									4,3903	4,3163	2,2674	2,2170	0,4714	0,4555	0,4395	0,0616	0,1620	0,1585	0,1560	0,1538	0,0252	0,0252
60,0									5,5580	5,4740	2,8204	2,7600	0,5744	0,5575	0,5415	0,0696	0,1860	0,1825	0,1800	0,1778	0,0304	0,0304
70,0									6,7257	6,6317	3,3734	3,3030	0,6774	0,6595	0,6435	0,0776	0,2000	0,1965	0,1940	0,1918	0,0356	0,0356
80,0									7,8934	7,7894	3,9264	3,8460	0,7804	0,7615	0,7425	0,0856	0,2140	0,2105	0,2080	0,2058	0,0408	0,0408
90,0									9,0611	8,9471	4,4794	4,3890	0,8834	0,8635	0,8435	0,0936	0,2					

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 2. Pérdidas en pies en tubería de PVC (PAVCO, 2014).

3.5.8. Altura dinámica

Es la altura total a la cual se quiere llevar un líquido teniendo en cuenta: alturas estáticas, más pérdidas en las tuberías y accesorios, tanto en succión como en descarga.

$$HDT = H_{es} + H_{fs} + H_{accesorios} \quad (1)$$

Donde:

H_{es} : Es la altura estática o diferencia de altura entre el lugar donde se succiona el líquido y el lugar donde se quiere llevar.

H_{fs} : Son las pérdidas por fricción en la tubería.

$H_{accesorios}$: Son las pérdidas en todos los accesorios que se utilizarán en la instalación.

3.5.9. Longitud equivalente

Es la conversión de un accesorio tubería (codos, tes, válvulas, etc.) En una longitud determinada de tubería recta de igual diámetro que el accesorio estudiado, la cual produce una pérdida por fricción igual a la que produciría este accesorio.

3.5.10. Cabeza neta positiva de succión

La cabeza neta positiva de succión (o NPSH – Net Point Suction Head) es la presión absoluta expresada en altura del líquido considerado, que debe tener como mínimo en la entrada de la bomba menos la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo. El NPSH puede ser disponible o requerido. El disponible es el cual se ha tenido en cuenta todos los factores de la instalación y el requerido es la presión mínima que necesita la bomba para un correcto funcionamiento sin cavitación. Normalmente los fabricantes de bombas incluyen en las curvas hidráulicas la gráfica del NPSH requerido para su cálculo. Por lo tanto, se debe cumplir que el NPSH disponible sea mayor o igual al NPSH requerido.

Para calcular el NPSH disponible se debe tener en cuenta:

$$NPSH \text{ DISP} = \text{Presión Atmosférica} - H_{es} - H_{PFS} - H_{PVL}$$

Donde:

Presión Atmosférica: 10.33 metros de columna de agua (m.c.a).

H_{es} : Altura estática en la succión.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

H_{pFS} : Altura por pérdidas por fricción en succión.

H_{pVL} : Altura equivalente a la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo.

En las Figura 9 y 10 se pueden apreciar las gráficas de tensión de vapor y presión barométrica para el cálculo de cada una de las variables respectivamente.

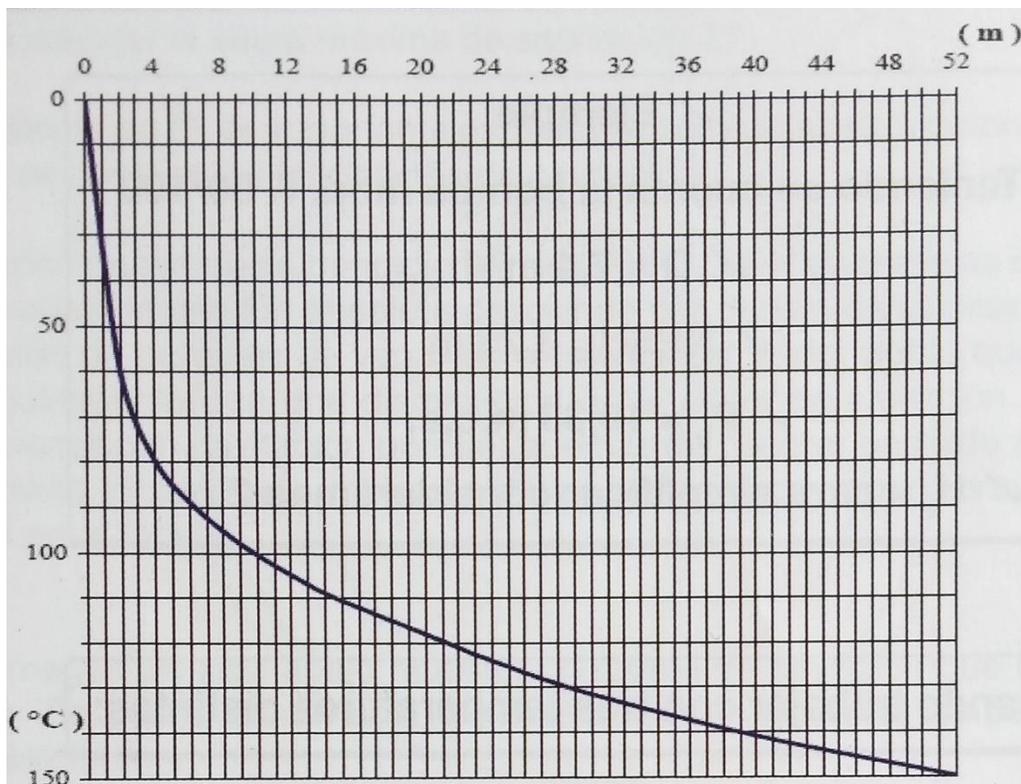


Figura 9. Tensión de vapor (DAB PUMPS, 2011).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

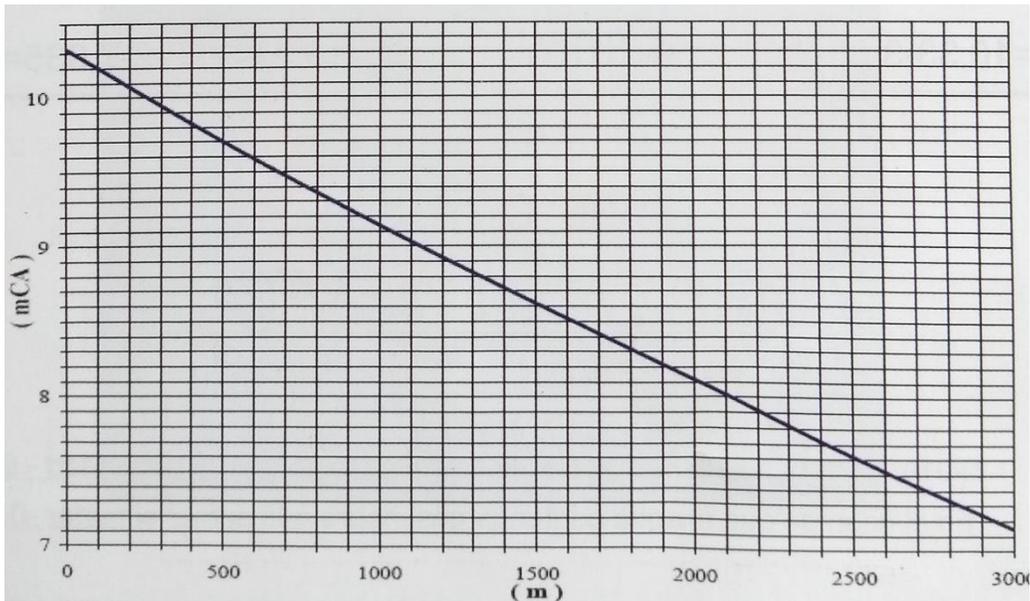


Figura 10. Presión barométrica (DAB PUMPS, 2011).

3.5.11. Curvas hidráulicas

La curva característica de una referencia de bomba centrífuga es una gráfica que representa la relación entre el caudal versus la presión. De estas dos variables depende tanto la potencia como el NPSH del punto hidráulico que se desea satisfacer. De esta forma, los fabricantes de bombas suelen generar para cada uno de sus modelos, curvas características para bombas centrífugas en función del punto de operación de la instalación en la que ésta se dispondrá.

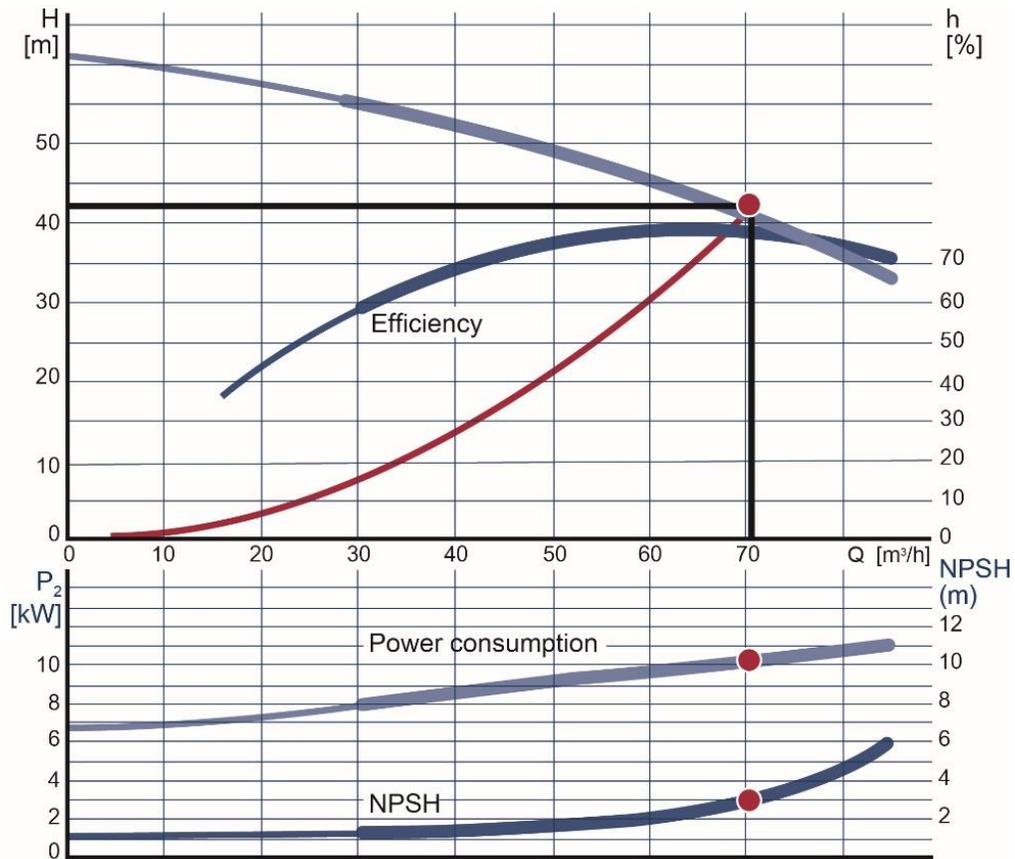


Figura 11. Curva Hidráulica (Grundfos, 2018).

Como se observa en la Figura 11 está definida una curva hidráulica para un modelo de bomba determinado, en donde se pueden apreciar los factores a tener en cuenta para un punto hidráulico deseado en una instalación, para dicho caso se encuentra que este modelo de bomba permite entregar para una cabeza de 42 mca un caudal de 71 metros cúbicos por hora con una eficiencia mayor al 70 % con un motor aproximado de 10 kW y un NPSH requerido de 3 m.

3.5.12. Potencia en bombas

Para calcular la potencia de la bomba existen diferentes maneras y generalmente cada fabricante en sus curvas hidráulicas entrega la potencia del motor que se debería usar para la bomba seleccionada, pero también se puede conocer las potencias requeridas de las bombas a través de la siguiente fórmula:

$$P_B = \frac{Q \rho g H_s}{746 e} \quad (2)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Donde:

P_B : Potencia del motor (HP)

Q : Caudal (m^3/s)

g : Gravedad (m/s^2)

ρ : Densidad (kg/m^3)

H_s : Cabeza neta

e : Eficiencia

3.5.13. Principio de Funcionamiento de una bomba centrífuga

El principio de funcionamiento de una bomba centrífuga parte de su adecuada instalación. Por lo tanto, el primer paso para su correcto funcionamiento es el cebado de la bomba, es decir llenar completamente la tubería de succión y la carcasa de la bomba por completo para evitar arranques en seco y dañar internamente alguno de sus componentes. Una vez cebada la bomba, la presión atmosférica lleva el líquido hasta el ojo de succión del rotor y la fuerza centrífuga desplaza el agua desde el centro del rotor hacia la periferia del mismo, haciendo que el agua gane energía cinética en la medida que se desplaza sobre el álabe, la voluta conduce el agua hacia la descarga y en la medida en que el agua se desplaza por áreas cada vez mayores en la voluta la energía cinética se convierte en energía de presión, tal como se observa en la Figura 12.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

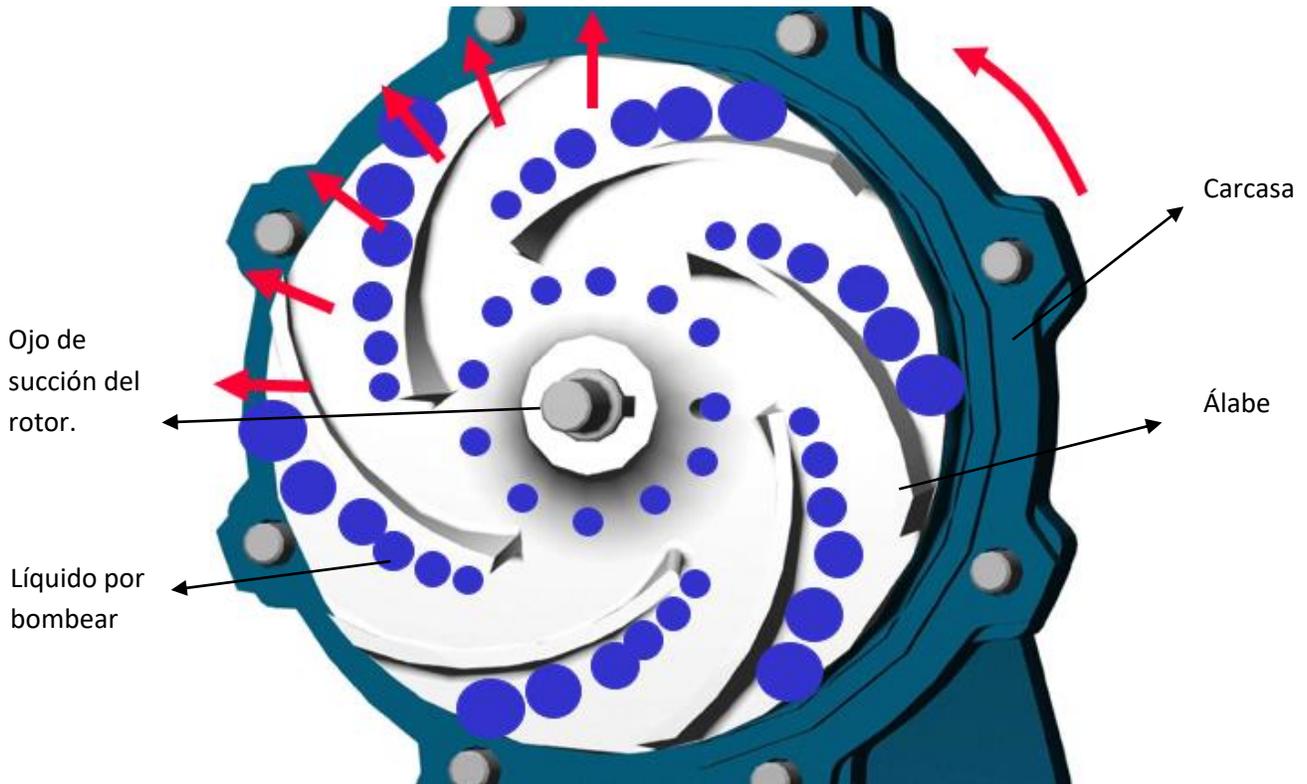


Figura 12. Funcionamiento interno de una bomba centrífuga (Ignacio Gomez IHM SAS, 2000).

3.5.14. Partes de una bomba centrífuga

Las partes fundamentales de una bomba centrífuga se dividen en:

3.5.14.1. Estáticas

3.5.14.1.1. Carcasa

Su función es encausar el líquido que sale del rotor y cambiar parte de la energía de velocidad en energía de presión.

3.5.14.1.2. Plato sello

Su función es sellar la zona húmeda de la bomba de las partes externas o secas.

3.5.14.1.3 Soporte de rodamientos

Su función es la de servir de estructura de apoyo y soporte de todas las fuerzas que son necesarias transmitir para hacer girar el rotor.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.5.14.2. Dinámicas

3.5.14.2.1. Rotor o impulsor

Su función es la de transmitir la energía de velocidad al líquido. La energía es transmitida por los álabes que éste posee.

3.5.14.2.2. Eje

Su función es la de llevar hasta el rotor la energía del elemento conductor de la bomba.

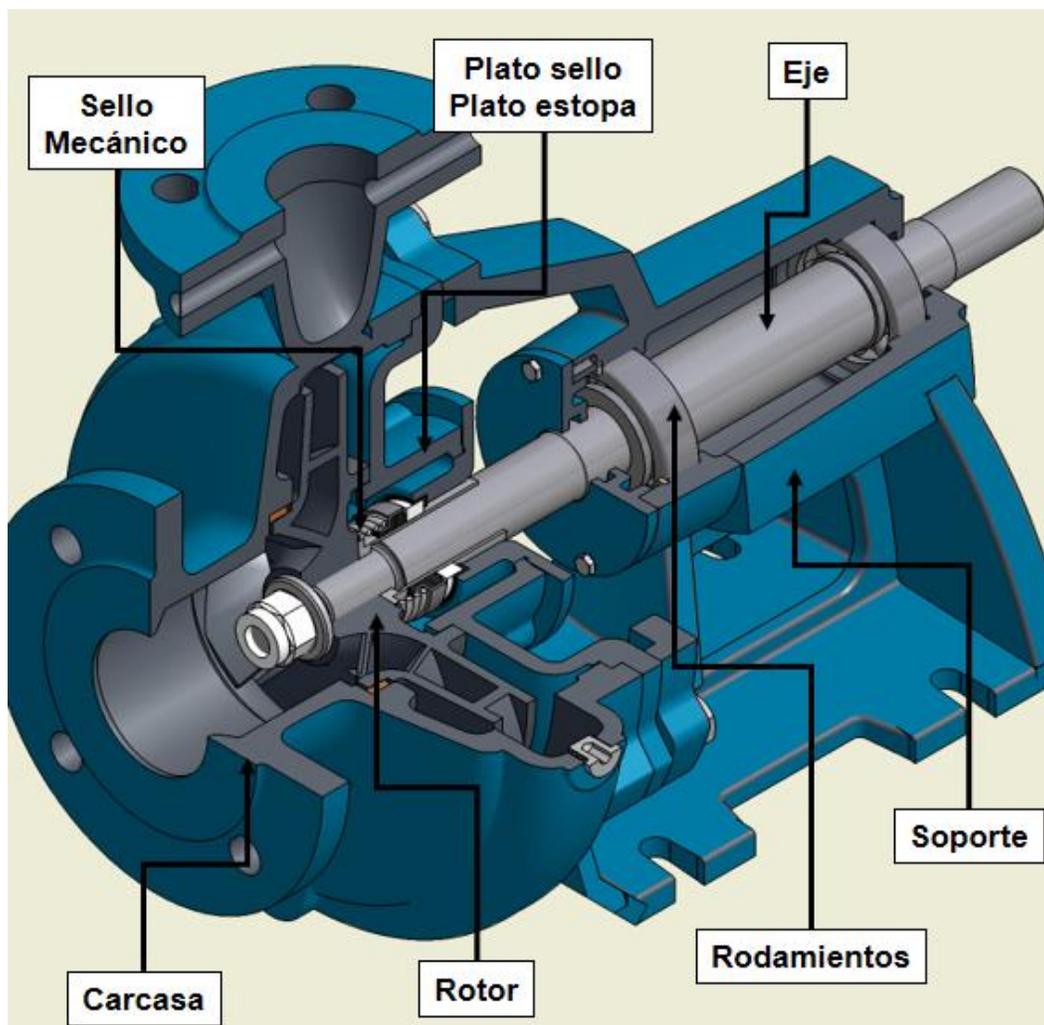


Figura 13. Partes de una bomba centrífuga (Ignacio Gomez IHM SAS, 2000).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.6. Bombas para pozos

La bomba del pozo entrega la fuerza motriz usada para extraer el agua del acuífero a la superficie. Generalmente se utilizan dos tipos de bombas de pozo: turbina vertical (Figura 14) y bombas sumergibles (Figura 15).

La selección de la bomba depende de muchos factores, incluyendo los siguientes:

- Caudal
- altura total
- Diámetro del pozo
- Profundidad del pozo
- Rectitud del pozo
- Presencia de arena en el agua
- Temperatura del agua
- Tipo de líquido a bombear (si es agua salada, termal, de pozo etc.)
- Valor de la acidez (rango de PH recomendado de 6 a 9)



Figura 14. Bombas turbina vertical (Hidromaster, 2008).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 15. Bombas tipo lapicero (Hidromaster, 2008).

Una vez elegido el tipo de bomba de acuerdo con las características del pozo, se selecciona la bomba y la clase de alimentación para la misma. Para este sistema híbrido se le suministrará energía eléctrica por medio de paneles solares y turbinas eólicas, por lo cual, la zona de instalación debe poseer un buen índice de radiación, así como una apropiada velocidad del viento para el adecuado funcionamiento del sistema híbrido de bombeo.

3.7. Energía solar

La radiación solar es el flujo de energía que recibe la tierra y que es emitida por el sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias. El sol entrega una energía aproximada de 1,4 kW por cada metro cuadrado sobre la superficie de la tierra (Energías sustentables, 2018). Para evaluar el potencial energético en un lugar determinado, es esencial contar con información detallada sobre su disponibilidad.

La energía solar puede ser aprovechada tanto directa como indirectamente. La radiación puede convertirse directamente en electricidad durante el día mediante células fotovoltaicas y almacenarse en baterías (Figura 16).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 16. Utilización de la energía solar de forma directa (ERENOVABLE, 2018).

El método indirecto de aprovechar la energía solar implica concentrar los rayos del sol mediante el uso de espejos o colectores introducidos en agua, que se puede utilizar para una variedad de propósitos, incluyendo el calentamiento de casas durante el invierno en las regiones más frías (Figura 17) (Valdiya, 2013).



Figura 17. Aprovechamiento de la energía solar de forma indirecta (Olmedo, 2009).

3.7.1. Células solares

Son dispositivos en los cuales su única función es convertir la energía lumínica del sol en energía eléctrica. La célula se compone de una capa delgada de material semiconductor, generalmente de silicio tratado adecuadamente para soportar la intemperie, con un espesor de aproximadamente 0,3 mm y una superficie de 100 a 225 cm². En condiciones de funcionamiento estándar (irradiación de 1 W / m² a una temperatura de 25 ° C), una célula fotovoltaica genera una corriente de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

aproximadamente 3 A con una tensión de 0,5 V y una potencia máxima igual a 1,5-1,7 W (Iniewski, 2013). Según su estructura, las células solares pueden clasificarse en diversos tipos.

3.7.1.1. Células solares fotovoltaicas monocristalinas

Las células monocristalinas tienen la mayor eficiencia de conversión. Actualmente su proceso de fabricación de semiconductores está bien establecido, ya que la investigación sobre este tipo de dispositivos data de hace varias décadas. Las células se fabrican a partir de silicio extremadamente puro y su eficiencia oscila entre 17 y 20%. El proceso de fabricación de células solares de silicio monocristalinas es muy intenso y costoso (Figura 18) (Energías renovables, 2014).

3.7.1.2. Células solares fotovoltaicas policristalinas

Las células fotovoltaicas policristalinas poseen una eficiencia en laboratorio de un 19%, y su rendimiento comercial oscila entre 13 y el 15%. Los paneles policristalinos tienen un menor precio que los monocristalinos, pero un mejor comportamiento a altas temperaturas. Estas características hacen que este tipo de células solares puedan generar mayor cantidad de energía eléctrica que las demás (Figura 18) (Energías renovables, 2014).

3.7.1.3. Células solares fotovoltaicas de capa fina

Este tipo de células se crearon básicamente para reducir costos de producción y salir de la posible escasez de silicio, obligando a que se empezara a investigar en celdas de otros materiales. Por lo tanto, una de sus principales ventajas, es que su precio es mucho menor y muy atractivo, aunque necesitan una mayor área para generar la misma energía que los paneles policristalinos o monocristalinos (Figura 18) (Energías renovables, 2014).

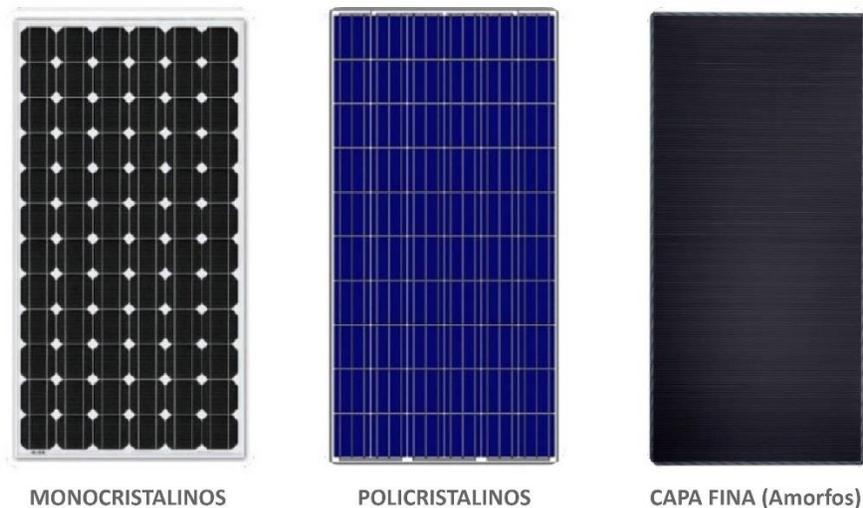


Figura 18. Tipos de células solares fotovoltaicas (Serrano, 2018).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.7.2. Parámetros fundamentales para el cálculo de un panel solar

Existen diferentes parámetros que se deben de tener en cuenta a la hora de implementar un panel solar como fuente de energía eléctrica, ya que, por medio de estos, se especifican sus características técnicas de operación.

3.7.2.1. Potencia máxima (Pmax). Es el valor de potencia obtenida en el producto entre el voltaje y la corriente máxima, esta potencia es la máxima disponible que puede llegar a entregar un panel solar en el pico de radiación, no obstante, para la selección de paneles no se recomienda trabajar la carga a la máxima potencia disponible.

3.7.2.2. Tensión máxima (Vmax). Es el valor de la tensión, cuando el panel está suministrando la corriente máxima.

3.7.2.3. Corriente máxima (Imax). Es la corriente que existe cuando el panel trabaja a una potencia máxima.

3.7.3. Ubicación de panel solar

Para lograr una buena optimización de la radiación solar, es imprescindible el conocimiento de la trayectoria solar y del perfil de las necesidades y de los condicionantes de la ubicación. Todo ello conlleva a determinar la orientación y la inclinación de los paneles solares en instalaciones fijas para conseguir el mínimo coste del kW/h de este tipo de energía renovable.

La orientación e inclinación de los paneles fotovoltaicos depende de la latitud en la que se encuentren. La orientación óptima de los paneles generalmente es de sur a norte y la inclinación óptima depende de la latitud del lugar y de la época del año en que se quiere utilizar (Figura 19). El objetivo es conseguir la máxima perpendicularidad del panel solar con respecto a la radiación solar recibida. De esta manera se obtendrá una mayor eficiencia energética (Energía Solar, 2016).



Figura 19. Inclinación del panel solar dependiendo de la época del año (Energía Solar, 2016).

Para garantizar la máxima eficiencia en un panel solar, es recomendable que la instalación de este, tenga un ángulo de inclinación de 18 grados respecto al eje horizontal de la parte lateral del panel,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

así mismo, buscar que la máxima radiación solar en horas del día sea perpendicular a este y el eje central del panel debe estar desfasado aproximadamente 192 grados del punto cardinal sur. Para un mejor entendimiento se presenta a continuación la Figura 20.

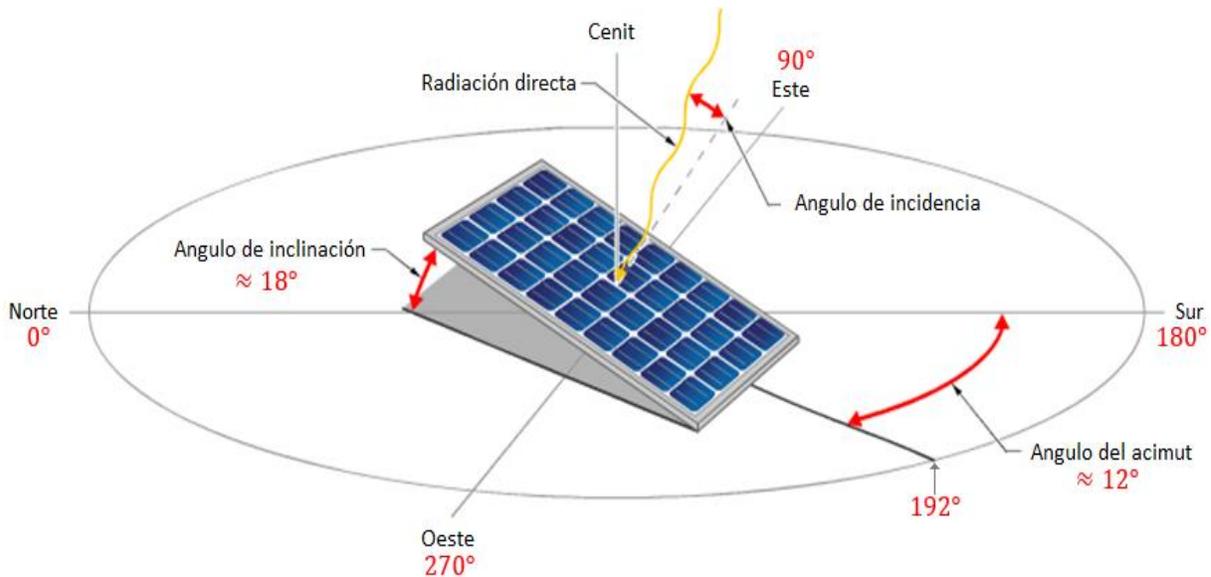


Figura 20. Ubicación idónea de un panel solar (Energía Solar, 2016).

3.7.4. Horas pico sol (HPS)

Las horas pico sol es un término muy utilizado en energía solar y hace referencia al tiempo que el sol está transmitiendo una energía de $1000\text{W}/\text{m}^2$. Este valor dependerá de la radiación solar propia de determinada zona. Se calcula de la siguiente manera:

$$\text{HSP} = \frac{\text{Radiación solar}}{1\text{kW}/\text{m}^2} \quad (3)$$

3.7.5. Aplicaciones de la energía solar

Por su naturaleza limpia y amigable con el medio ambiente, y además por ser de fácil ejecución, la energía solar es utilizada en amplia variedad de aplicaciones tanto en la industria como en el hogar. Su implementación va desde sistemas rudimentarios y simples como la calefacción de un hogar, hasta complejas aplicaciones industriales. La energía solar se utiliza principalmente para la iluminación de señales de tránsito, teléfonos de emergencia, accesorios de paisaje, artefactos domésticos y el caso propio para la alimentación de una bomba de agua como se ve en la Figura 21.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

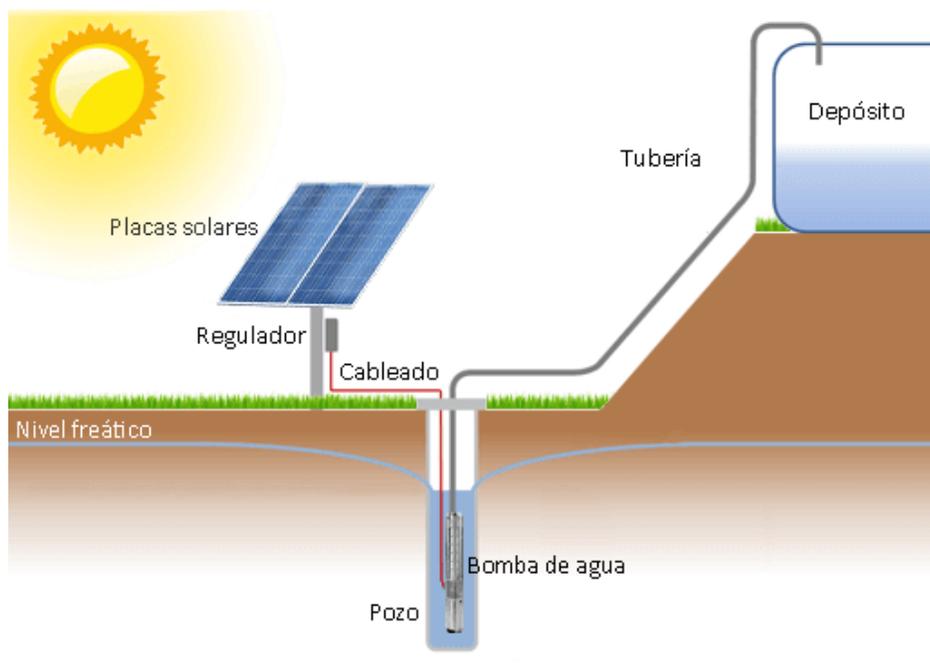


Figura 21. Esquema bombeo energía solar (volt Delta, 2018).

3.7.6. Energía solar en Colombia

A mediados del siglo pasado, Colombia empezó a incluir en diferentes sectores del país energías alternativas, utilizando la radiación solar para producir electricidad con recursos renovables y de fácil acceso a sectores rurales. Para la década de los 80 la energía solar fotovoltaica ya empezaba a implementarse en el país, inicialmente se instalaron pequeños generadores para radioteléfonos en sectores rurales y más adelante se instalarían sistemas fotovoltaicos con más capacidad para antenas satelitales.

Los primeros pasos en el uso de este recurso tuvieron lugar en Santa Marta en los años cincuenta, con la instalación de calentadores solares en las casas de trabajadores de las bananeras, la propuesta de la energía solar se extendió a ciudades como Bogotá en los años sesenta, implementando calentadores de origen israelí, luego, en la década de 1980 ciudades como Medellín y Manizales promovieron masivamente el uso de este recurso, adhiriéndose también la costa Atlántica por lo que el ICONTEC reglamentó el uso de calentadores solares en Colombia. Más tarde con el apoyo de fundaciones, este recurso pudo expandirse a hospitales y centros comunitarios. Actualmente con el reciente ingreso de Colombia a la Agencia de Energías Renovables (Irena) se abre una nueva cantidad de compromisos con la implementación y expansión masiva de este tipo de energía renovable alrededor del territorio nacional. (América Fotovoltaica , 2018)

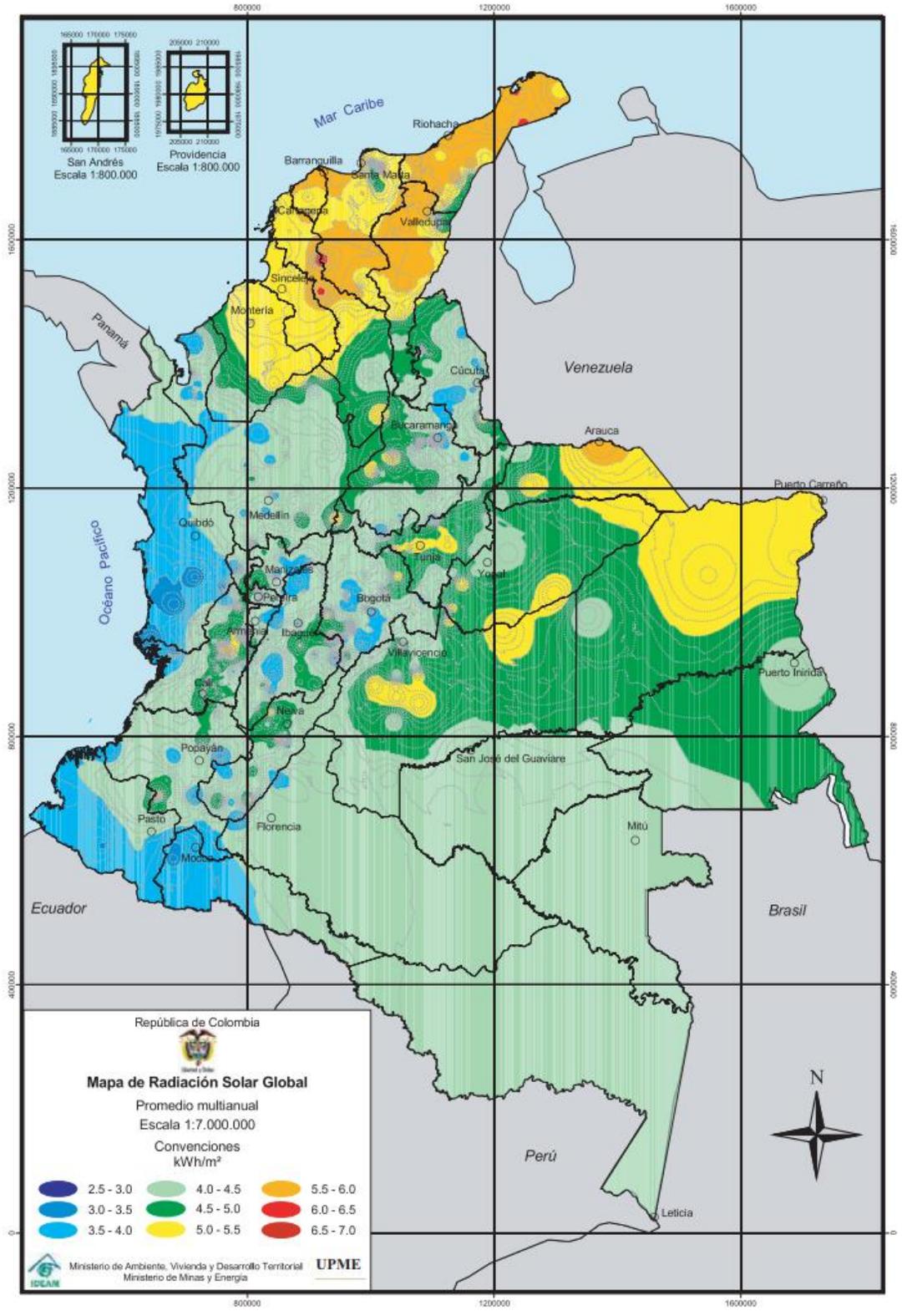
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Debido a su ubicación ecuatorial, Colombia es un país privilegiado a la hora de implementar la energía solar, ya que, cuenta con radiación solar constante en determinadas zonas del territorio, uno de los elementos claves para convertirse en generador de energía solar. Este efecto puede durar las 12 horas al día, registrando incluso los índices más altos a nivel mundial. Por lo que, con una menor cantidad de paneles solares, a diferencia de otros países, es posible alimentar o abastecer las necesidades energéticas de determinada aplicación.

La UPME (Unidad de Planeación Minero Energética) que pertenece al Ministerio de Minas y energía de Colombia y el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) crearon en el 2005 un Atlas de radiación en Colombia (Figura 22) que recopila la información básica de referencia para el aprovechamiento de la energía solar como una opción para el uso sostenible de los recursos energéticos de Colombia, así mismo a escala macro, la región más atractiva desde el punto de vista eólico es la Costa Atlántica Colombiana, donde los vientos aumentan en dirección a la península de La Guajira. Se han identificado otras regiones de interés como el departamento de Arauca y algunas zonas de los altiplanos en las cordilleras (América Fotovoltaica , 2018).

Teniendo en cuenta que 1 de cada 5 personas carece de energía eléctrica en su hogar y que la energía solar fotovoltaica en Colombia permite mayor acceso a sectores rurales a bajo costo, es una gran oportunidad de reducir el efecto invernadero, conservar nuestros recursos naturales e incrementar la cobertura de energía para familias del sector rural colombiano.

En la actualidad, las empresas de energía solar en Colombia que se dedican a la venta de paneles solares, instalaciones de sistemas solares fotovoltaicas, le apuestan a promover el uso inteligente de la energía, respondiendo a una necesidad mundial: generar energía con elementos no contaminantes (América Fotovoltaica , 2015).



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Figura 22. Mapa de radiación solar en Colombia (IDEAM; UPME, 2005).

3.7.7. Cálculo de paneles solares

Realizar un correcto dimensionamiento de los paneles solares es una parte fundamental para garantizar la confiabilidad de un sistema. El cálculo del número de módulos requeridos incluye variables que son propias de la zona afectada tales como la radiación solar, la energía diaria requerida por el sistema que se va a alimentar y las horas pico sol (HPS) (Fernández, 2015).

$$Nm = \frac{\text{Energía requerida}}{\text{HPS} \times \text{Rendimiento} \times W_p} \quad (4)$$

Donde:

Nm: Es el número de módulos o de paneles solares necesarios en el sistema.

Energía requerida: Es la cantidad de energía eléctrica diaria que deben suministrar los paneles.

HPS: Horas pico sol de la zona afectada

Rendimiento: Relaciona el porcentaje de conversión de energía solar en energía eléctrica, se encuentra por lo general entre 0,7 y 0,8.

W_p: Es la potencia nominal de los módulos que se utilizarán (Fernández, 2015).

3.8. Energía eólica

Actualmente, existe una alta demanda de energía eléctrica que tiende a aumentar con el paso de los años mientras que los recursos fósiles más empleados para su producción disminuyen considerablemente. La anterior es la razón principal para que se presente un auge en el aprovechamiento de las energías renovables, especialmente la solar y la eólica. Al igual que la energía solar, la energía eólica se está desarrollando actualmente en forma exponencial con el fin de disminuir costos y aumentar eficiencias. En algunos países como Alemania, España, Francia, entre otros, se está supliendo parte de la necesidad energética nacional por medio de parques eólicos que constan de grandes turbinas aerogeneradoras (Sánchez Gallego, 2016).

3.8.1. Fenómeno eólico

La energía eólica es producida a través de la energía solar. La radiación solar calienta diferentes partes de la Tierra a distintas velocidades, esto hace que partes de la atmósfera se calienten de manera más rápidas que otras. Cuando el aire caliente se eleva, reduce la presión atmosférica en la superficie de la Tierra, y el aire más frío entra para reemplazarlo, el resultado de este fenómeno lo

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

conocemos como viento (Figura 23). El aire tiene masa, y cuando está en movimiento, contiene la energía de ese movimiento, mejor conocido como energía cinética. Parte de esa energía se puede convertir en otras ya sea fuerza mecánica o electricidad que se pueden aprovechar para su uso práctico. La energía mecánica es más comúnmente usada para bombear agua en lugares rurales o remotos y la eléctrica para los hogares y la industria (Gevorkian, 2010).

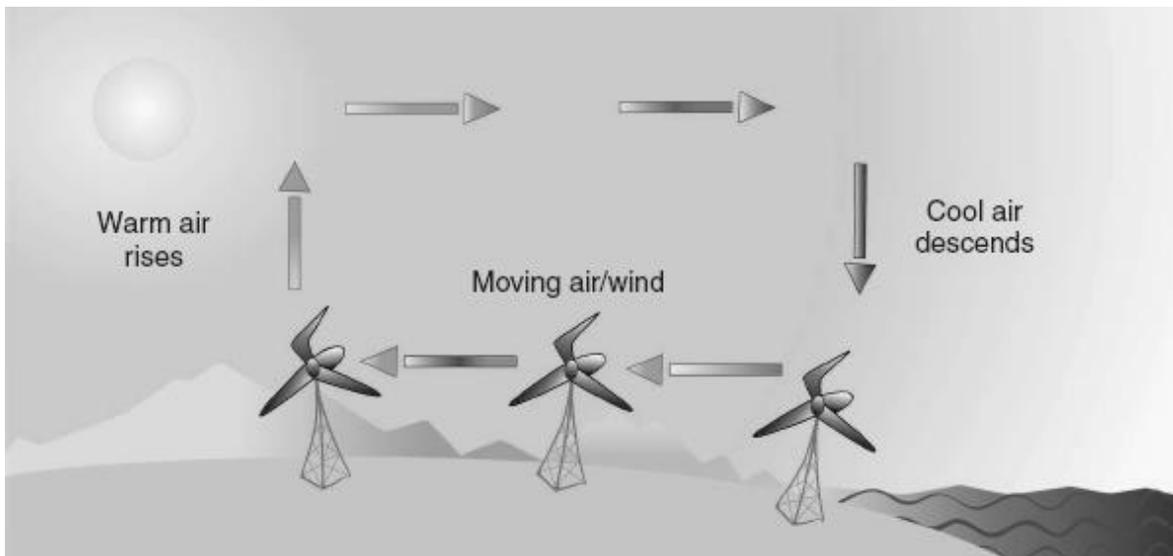


Figura 23. Fenómeno eólico (Gevorkian, 2007).

3.8.2. Turbinas eólicas

Una turbina eólica es un dispositivo mecánico que convierte la energía del movimiento del viento (energía cinética) en la energía mecánica o movimiento de un eje, luego en los generadores de la turbina, esta energía mecánica se convierte en electricidad. La electricidad generada se puede almacenar en baterías, o utilizar directamente.

3.8.3. Componentes de una turbina eólica

Los aerogeneradores pueden tener una longitud de hasta 200 metros de altura y su peso de hasta 20 toneladas. (Mishnaevsky, y otros, 2017) Su estructura y sus componentes son complejos y están fabricados para garantizar una mayor eficiencia en la generación de energía a partir de la velocidad del viento (Figura 24).

3.8.3.1. La base

Los aerogeneradores de eje horizontal se construyen con una cimentación subterránea de hormigón armado que se adapta al terreno en el que se encuentra y ayuda a soportar las cargas del viento.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.8.3.2. La torre

La torre es la parte del aerogenerador que soporta todo el peso y es la que mantiene elevadas del suelo las palas. Es de hormigón por la parte de abajo y de acero por la de arriba. Habitualmente es hueca para permitir el acceso a la góndola. La torre es la encargada de elevar el aerogenerador lo suficiente para que pueda aprovechar las máximas velocidades de viento posible. Al extremo de la torre se fija una góndola giratoria de acero o fibra de vidrio. (Mishnaevsky, y otros, 2017)

3.8.3.3. Palas

Las turbinas actuales están formadas por tres palas ya que proporcionan una mayor suavidad en el giro. Las palas están fabricadas de un material compuesto de poliéster con un refuerzo de fibras de vidrio o carbono. Estos compuestos les otorgan una mayor resistencia a las palas. Las palas pueden llegar a medir hasta unos 100 metros de largo y van conectadas al buje del rotor. Gracias a este buje, las palas pueden cambiar el ángulo de incidencia de las palas para aprovechar bien el viento. (Mishnaevsky, y otros, 2017)

3.8.3.4. Rotor

En cuanto al rotor, en la actualidad es horizontal y puede tener articulaciones. Normalmente, este está situado a barlovento de la torre. Esto se hace para poder reducir las cargas cíclicas sobre las aspas que aparecen si se situara al sotavento de ella, ya que, si se coloca una pala por detrás de la estela de la torre, la velocidad que incide estará muy alterada. (Mishnaevsky, y otros, 2017)

3.8.3.5. Góndola

Se trata de un cubículo que se podría decir que es la sala de máquinas del aerogenerador. La góndola gira en torno a la torre para colocar la turbina mirando en dirección al viento. En la góndola se encuentra la caja de cambios, el eje principal, los sistemas de control, el generador, los frenos y los mecanismos de giro.

3.8.3.6. La caja de cambios

La función que tiene la caja de cambios es la de adecuar la velocidad de giro del eje principal a la que necesita el generador.

3.8.3.7. Generador

En los aerogeneradores de hoy en día existen tres tipos de turbinas que varían sólo por el comportamiento del generador cuando éste se encuentra en condiciones de excesiva velocidad de viento y se intentan evitar las sobrecargas.

Generalmente las turbinas emplean uno de estos 3 sistemas:

- Generador de inducción de jaula de ardilla.
- Generador de inducción bifásico.
- Generador síncrono. (ALVAREZ & TARGARONA, 2011)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.8.3.8. Sistema de frenado

El equipo de frenado es un sistema de seguridad que cuenta con discos que ayudan en situaciones de emergencia o en casos donde se necesita parar el sistema para realizar algún tipo de mantenimiento al molino y evitar daños en las estructuras.

3.8.3.9. Sistema de control

El molino eólico está totalmente controlado y automatizado por el sistema de control. Este sistema está formado por ordenadores que manejan la información que suministran la veleta y el anemómetro colocados encima de la góndola. De esta forma, conociendo las condiciones meteorológicas, se puede orientar mejor al molino y las palas para optimizar la generación de energía con el viento que sopla. Toda la información que reciben sobre el estado de la turbina se puede enviar de forma remota a un servidor central y tenerlo todo controlado. En caso de que las velocidades del viento o las condiciones meteorológicas puedan dañar la estructura del aerogenerador, con el sistema de control se puede conocer rápido la situación y activar el sistema de frenado, evitando así daños.

Gracias a todas estas partes del aerogenerador se puede generar energía eléctrica a partir del viento de una forma renovable y no contaminante para el medioambiente (Energía Doble Cero, 2018).

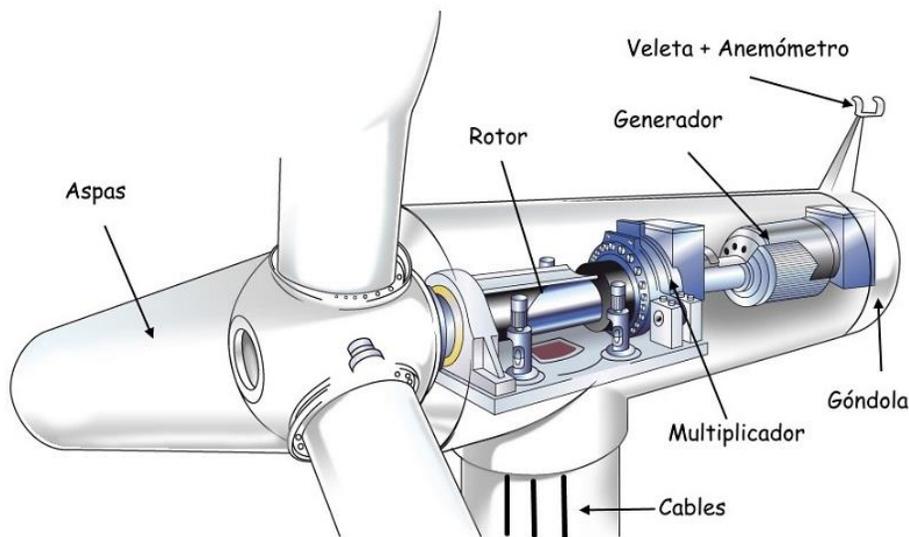


Figura 24. Componentes de una turbina eólica (PORTILLO, 2018).

3.8.4. Tipos de turbinas eólicas

Hay dos diseños básicos en turbinas eólicas, las máquinas de eje vertical y de eje horizontal (Figura 25), estas dependen del tipo de hélice. Las turbinas de viento de eje horizontal son las más comunes

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

hoy en día, constituyendo casi todas las turbinas de escala de utilidad (100 kW de capacidad y mayores) en el mercado global. El eje del rotor de la turbina eólica de eje horizontal es paralelo al flujo del viento mientras que el eje del rotor de la máquina de eje vertical es transversal al viento (Scada solutions, 2018).

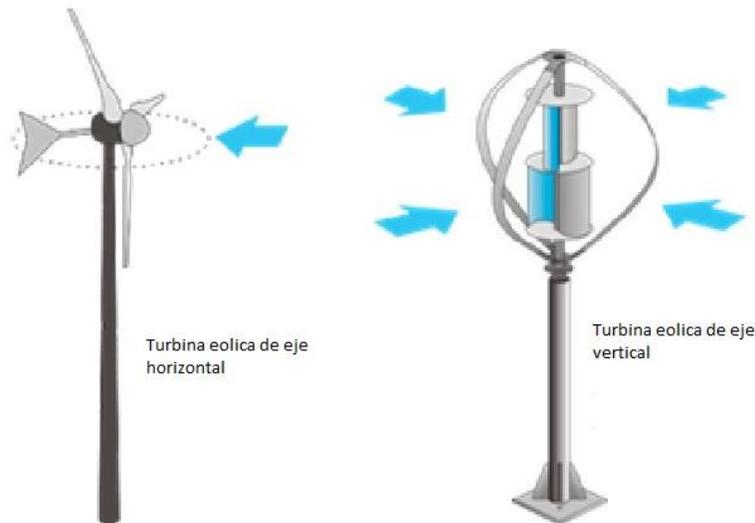


Figura 25. Tipos de turbina eólica (Suministros y montajes eólicos S.L, 2018).

3.8.4.1. Turbinas de eje horizontal

Básicamente es una máquina rotacional en la que el movimiento se produce por la energía cinética del viento cuando este actúa sobre un rotor que normalmente dispone de tres palas. El movimiento rotacional producido es transmitido e incrementado mediante un multiplicador de velocidad hasta un generador que es el que se encarga de producir la energía eléctrica (ver Figura 25).

Cada aerogenerador posee un microprocesador que se encarga de controlar y regular las variables como lo son la máxima velocidad de rotación, exceso de voltaje e incremento de corriente mayor a la de diseño, además verifica el estado de puesta en marcha, funcionamiento y parada. Éste lleva toda esta información y datos a la central de control de la instalación. Cada uno de estos aerogeneradores incorpora, en la base de la torre, un armario con todos los componentes eléctricos (interruptores automáticos, transformadores de intensidad, protectores de sobre tensión, etc.) que facilitan el transporte de la energía eléctrica generada hasta la conexión de red o puntos de consumo (PORTILLO, 2018).

La energía que se obtiene desde un aerogenerador depende de la potencia del viento que atraviesa el rotor y es directamente proporcional a la densidad del aire, la superficie barrida por sus palas y la velocidad del viento.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El funcionamiento de un aerogenerador se caracteriza por su curva de potencia que indica el rango de velocidades de viento en las que se puede operar y la potencia que se necesita para cada caso.

3.8.4.2. Aerogenerador de eje vertical

La turbina eólica de eje vertical tiene varias ventajas importantes ya que funciona con el viento acercándose desde cualquier dirección, el generador puede instalarse en la base de la máquina y las cargas mecánicas primarias en las paletas son tensas. Los coeficientes de potencia medidos son consistentemente más bajos que los de los aerogeneradores de turbina horizontal. Algunas desventajas son que el par aerodinámico solo ocurre cuando la hoja se mueve a través del viento, lo que da como resultado una pulsación de torque. Además, cuando una cuchilla gira de ceñida a sotavento, la fuerza aerodinámica del viento invierte la dirección. Esto contribuye a la fatiga de la cuchilla (ver Figura 25) (Gstriatum, 2015).

3.8.5. Rendimiento de la turbina eólica

El rendimiento de las turbinas eólicas depende de la intensidad del viento, por lo tanto, antes de decidir instalar un sistema eólico es indispensable conocer bien las características del viento en el lugar en el que se piensa instalar los aerogeneradores. Estos conocimientos se obtienen realizando preventivamente un atento estudio de la frecuencia, de la velocidad, de la duración y de la dirección del viento.

La intensidad del viento depende de las características del terreno. Una circunstancia fundamental es la rugosidad del terreno: en llanura o en el mar el viento sopla con intensidad mayor que en el campo o en los alrededores de las ciudades. Otro elemento para tener en cuenta es la altura del terreno: cuanto más se sube mayor es la velocidad del viento.

Las máquinas eólicas funcionan dentro de parámetros mínimos y máximos de la velocidad del viento. En línea general:

- Pueden ser activados con viento variable de 2 a 4 m/s.
- Cuando el viento alcanza la velocidad de 10–14 m/s (velocidad de corte o nominal), se activa un dispositivo de control de la potencia.
- Se paran cuando la velocidad del viento supera los 20-25 m/s

La potencia en el aire en movimiento a través del rotor de la turbina eólica se calcula de la siguiente manera:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3$$

Donde P es la potencia (W), ρ es la densidad del aire en kg / m^3 , $A = \pi \cdot r^2$ es el área barrida del rotor (m^2), r es el radio del rotor (m) y V es la velocidad del viento en el disco del rotor en m / s.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Al expresar la potencia de una turbina eólica se debe tener en cuenta la eficiencia aerodinámica de esta, que se denomina coeficiente de rendimiento o potencia. (C_p).

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \quad (5)$$

Donde C_p representa el punto de operación de la turbina y depende de los parámetros mecánicos de la turbina incluyendo la relación de velocidad de punta (la relación de velocidad de la punta del rotor a la velocidad del viento, $\lambda = \omega R / V$) y el ángulo de inclinación de las cuchillas (θ). El valor teórico máximo para C_p se llama límite de Betz, que es 0.59, lo que significa que, en la mejor situación, se puede extraer el 59 por ciento de toda la potencia en el viento que atraviesa la turbina (Ver Figura 26).

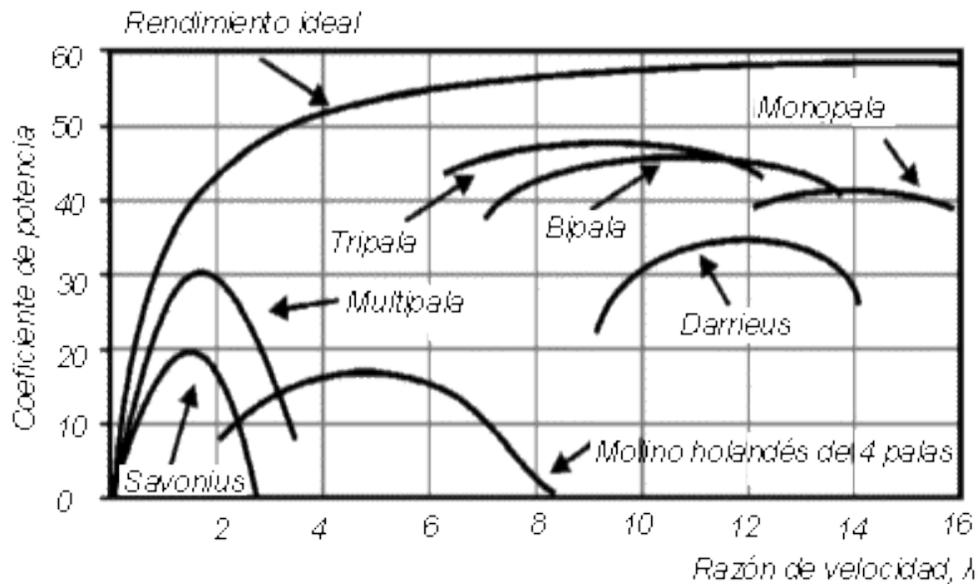


Figura 26. Relación entre la razón de velocidad de punta y el coeficiente de potencia, para diferentes tipos de máquinas eólicas (Figueredo, 2018)

3.8.6. Energía Eólica en Colombia

Colombia es un país privilegiado por su posición geográfica. No solo cuenta con gran variedad de climas, también presenta uno de los niveles de radiación solar más altos en el mundo, dándole una gran ventaja en el uso de energía solar.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Según el Mapa Eólico de Colombia (ver Figura 27), se destacan 16 lugares del país donde las intensidades del viento son importantes para el aprovechamiento del recurso eólico. Existen 3 sitios donde los vientos son persistentes y superiores a 5m/s durante todo el año: Galerazamba en el Departamento de Bolívar, Gachaneca en Boyacá y la isla de San Andrés en el mar Caribe colombiano. Hay 3 sitios donde las velocidades son persistentes, pero en el rango entre los 4 y 5m/s: La Legiosa en el Huila, Isla de Providencia en el Mar Caribe y Riohacha en La Guajira. Los restantes 10 lugares no guardan una gran persistencia en la velocidad del viento excepto para determinadas épocas y/u horas del año como son: Villacarmen en Boyacá, Obonuco en Nariño, Cúcuta y Ábrego en Norte de Santander, Urrao en Antioquia, Soledad en Atlántico, Santa Marta en Magdalena, Bucaramanga en Santander, Anchique en Tolima y Bogotá en Cundinamarca (Piedrahita & Posada, 2005).

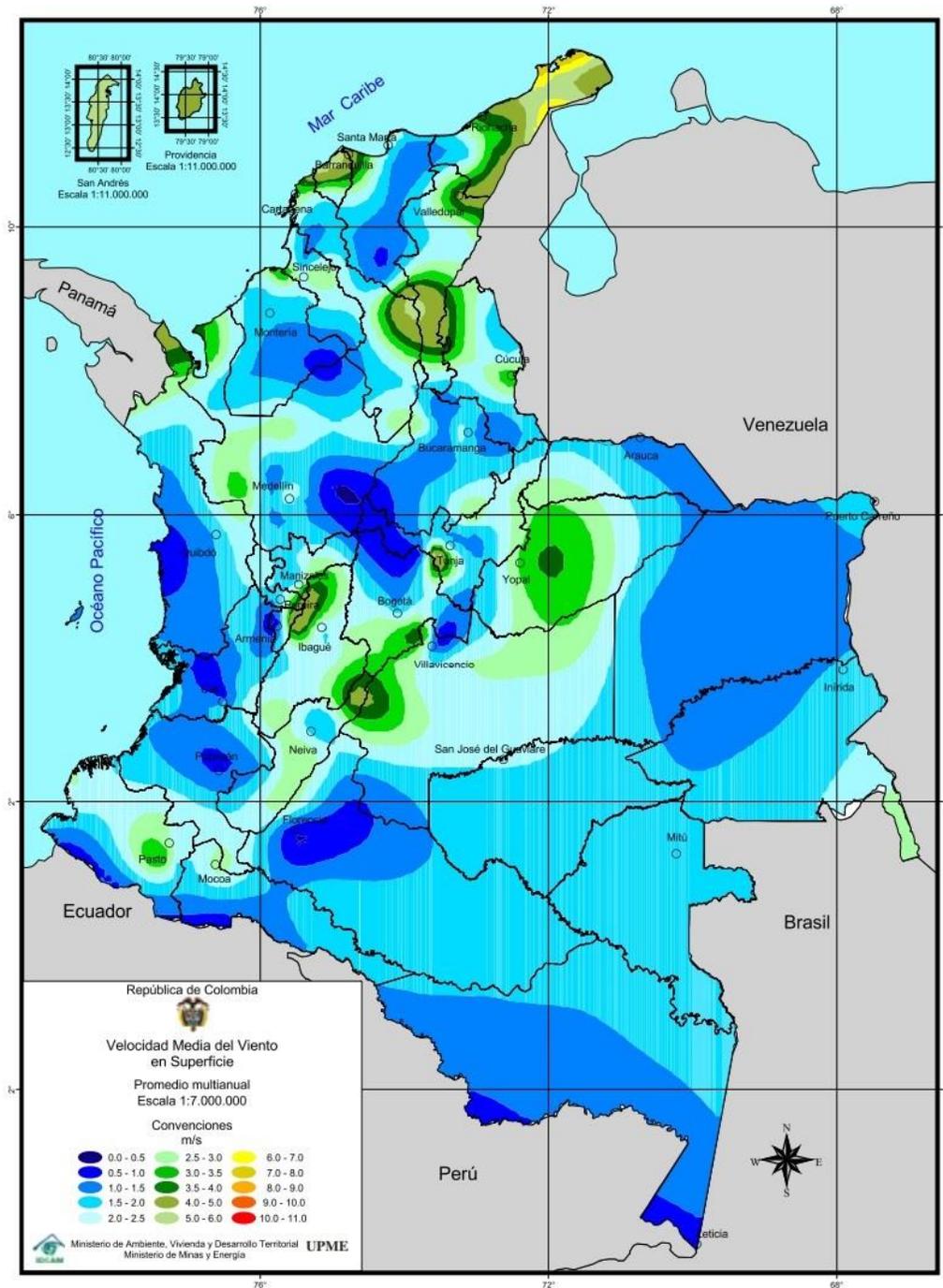


Figura 27. Mapa de velocidad media del viento en Colombia (IDEAM; UPME, 2005).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. METODOLOGÍA

El sistema híbrido de bombeo está basado en un proyecto piloto ejecutado como regalías empresariales de las compañías Durespo S.A y el Cerrejón, el proyecto estuvo a cargo del señor Carlos Mario Ochoa, autor del presente trabajo. Solo hasta la fecha se documenta la labor realizada. Según la experiencia obtenida se realiza el siguiente procedimiento comenzando por el análisis de la zona donde se desea intervenir con tecnologías de energías renovables.

Existen en Colombia lugares remotos que no cuentan con el servicio de agua para la comunidad; el 28 % de la población rural de Colombia enfrenta una situación crítica por la falta de acueducto. esta cifra equivale por lo menos a 3,1 millones de colombianos. Zonas como el Atlántico y el Pacífico son las regiones con mayor población carente del servicio (JIMÉNEZ, 2015). La Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica (Acolgen) destaca que por lo menos unas 470.000 viviendas no tienen acceso al servicio de electricidad (Sáenz, 2017). Una red eléctrica, un acueducto y un alcantarillado son indispensables para satisfacer las necesidades básicas de poblaciones de bajos recursos; generalmente el principal servicio público que se desea en estas zonas es el acueducto, ya que la mayoría de estos lugares no cuentan con ríos y la recolección de aguas lluvias se hace imposible debido a la poca frecuencia de precipitaciones.

4.1 Sitio de instalación

Para el desarrollo de este trabajo fue necesario estudiar una comunidad del país donde existieran problemas con los suministros de agua potable y de energía eléctrica, dicho estudio fue realizado por la empresa el Cerrejón, debido a que la explotación de la mina de carbón debe cumplir con regalías para la población más afectada y de bajos recursos. El sistema híbrido de bombeo es un proyecto piloto para aplicarlo a demás comunidades donde no se cuenta con el servicio de agua potable ni cobertura de operadores de red eléctrica. La zona que se interviene está en el departamento de la Guajira, cerca al sector Santa Ana, contiguo a Cuatro Vías, (ver Figura 28) donde actualmente habita la comunidad Wayuu. Este sistema beneficia alrededor de 40 familias y, además, a una institución educativa rural; evitando así, el desplazamiento de largas distancias para el abastecimiento de agua. La viabilidad de este proyecto dependió de diversos factores tales como; la presencia de un acuífero y, además, contar con los índices de radiación y velocidad del viento adecuados para su implementación. Por estas razones se realiza el estudio topográfico para analizar la posibilidad de disponer de una fuente de agua subterránea que pueda suplir la necesidad de las personas que habitan allí. Si se tiene en cuenta que cada persona consume mensualmente en promedio 3,8 metros cúbicos de agua, según datos de Empresas Públicas de Medellín, y que en la comunidad afectada habitan entre 120 y 130 personas, se debe tener una reserva de agua superior a 17 metros cúbicos diarios para poder suplir la carencia de este recurso; por tal motivo se debe establecer un aforo el cual contempla una reserva de agua lo suficientemente confiable que

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

garantice el abastecimiento a toda la población. Dicho aforo es realizado bajo un estudio topográfico a través de un tercero, en este caso en específico, los topógrafos calculan una fuente de agua subterránea a una profundidad de 120 m de la superficie con una capacidad máxima de 5 litros por segundo.



Figura 28. Comunidad Wayuu. Maicao (Mora, 2013).

Cabe aclarar que un aforo adecuado es un factor muy importante en la implementación de dicho proyecto, ya que existe la posibilidad de encontrar aguas subterráneas, pero de un tiempo de uso muy corto o de muy bajo caudal. Como requisito fundamental, no se puede nunca superar el caudal suministrado por el topógrafo, ya que, se puede correr el riesgo de secar el pozo provocando que internamente se derrumbe y de esta manera perder la estructura del pozo, la bomba y los accesorios inmersos en él.

Después de analizar a la población y la fuente de agua subterránea, se estudian las condiciones territoriales de la zona con el fin de conocer estadísticamente los parámetros de radiación y la velocidad promedio del viento, ya que, son características esenciales en la implementación del sistema. La velocidad del viento es un elemento crucial en la proyección del rendimiento de la turbina. Generalmente, se requiere una velocidad promedio anual del viento mayor de 4 m / s, o 9

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

mi / h, para turbinas eléctricas de viento pequeño. Se requiere menor velocidad del viento para las operaciones de bombeo de agua (Gevorkian, 2010).

La utilización de una sola fuente de energía para satisfacer las necesidades de un sistema produce ciertos inconvenientes, el principal de ellos, la disponibilidad del recurso para su aprovechamiento. los sistemas híbridos de generación eléctrica presentan grandes ventajas. Un diseño de un sistema híbrido busca:

- Garantizar la generación de la energía necesaria.
- Minimizar la dependencia del sistema de almacenamiento.
- Optimizar el aprovechamiento de los recursos energéticos.
- Disminuir los costos del sistema, de la instalación y los costos operativos (Díaz, 2013).

4.2 Pozo

Para suplir la necesidad del recurso hídrico en la comunidad Wayuu en Maicao, Guajira, el estudio topográfico entrega los siguientes datos cruciales para el avance del proyecto.

Se encuentra una fuente de agua subterránea de agua en un acuífero cautivo a una profundidad de 120 metros con un aforo de rendimiento seguro de 5 litros por segundo, un espejo de agua a un nivel de 28 metros de la superficie con un aforo de extracción de agua sostenido permisivo a 2 litros por segundo y un rendimiento máximo sostenido a 1 litro por segundo, es decir el pozo realizado en la zona presenta un aforo con óptimas condiciones para la implementación de un sistema de bombeo y dependiendo la profundidad de la bomba, permitirá diferentes caudales de extracción. Se debe tener en cuenta que a mayor profundidad mayor caudal podrá ser extraído del acuífero, pero también aumentará significativamente la potencia de la bomba, ya que, la altura estática que debe vencer es mayor y requiere un motor de más capacidad. Para un mejor entendimiento del pozo realizado se presenta la Figura 29.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

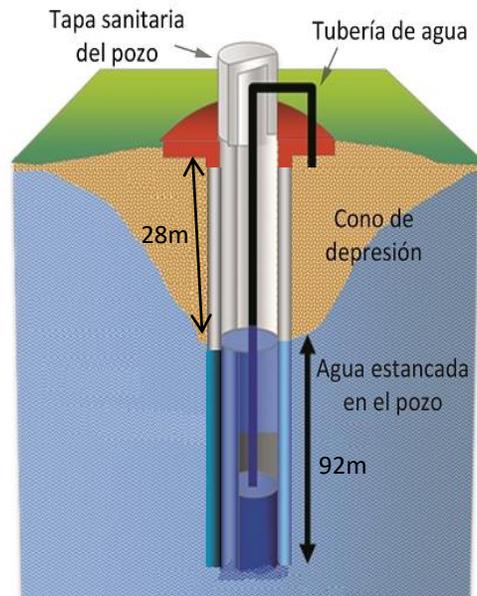


Figura 29. Detalles pozo de agua (ruralsupplies.eu, 2018).

Por lo tanto, para efectos del presente trabajo se sugirió instalar la bomba sumergible a una profundidad no menor del nivel del espejo de agua y respetando como mínimo 1 metro por encima del fondo del acuífero cautivo según recomendaciones del fabricante debido a la cantidad de sólidos permisibles de la bomba y la refrigeración misma del motor. Además, se debe tener en cuenta que el aforo realizado por los topógrafos es estimado y puede variar con el tiempo según la época del año, así que al pozo se le debe dar un tiempo de recuperación y no exceder el consumo de agua sostenido permisible.

4.3 Selección de bomba hidráulica

Una vez conocidos las características del pozo se selecciona la bomba adecuada para dicha aplicación, los parámetros para elegir la bomba hidráulica son:

4.3.1. Presión o Cabeza hidráulica

La cabeza hidráulica para la selección de la bomba se obtiene al sumar la altura estática que va desde la boca de descarga del equipo hasta la boca de llenado del tanque de almacenamiento, a la altura anterior se le debe sumar las pérdidas por fricción en la tubería más las pérdidas de los accesorios, basándose en las Tablas 1 y 2.

Para el cálculo de la cabeza hidráulica se deben conocer las longitudes y los accesorios con los cuales se realizará exactamente la instalación. Se recomienda en lo posible sumar un porcentaje de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

seguridad del 20% como margen de error al momento de la instalación y también debido a que la tubería con el paso de los años aumenta su rugosidad incrementando las pérdidas por fricción.

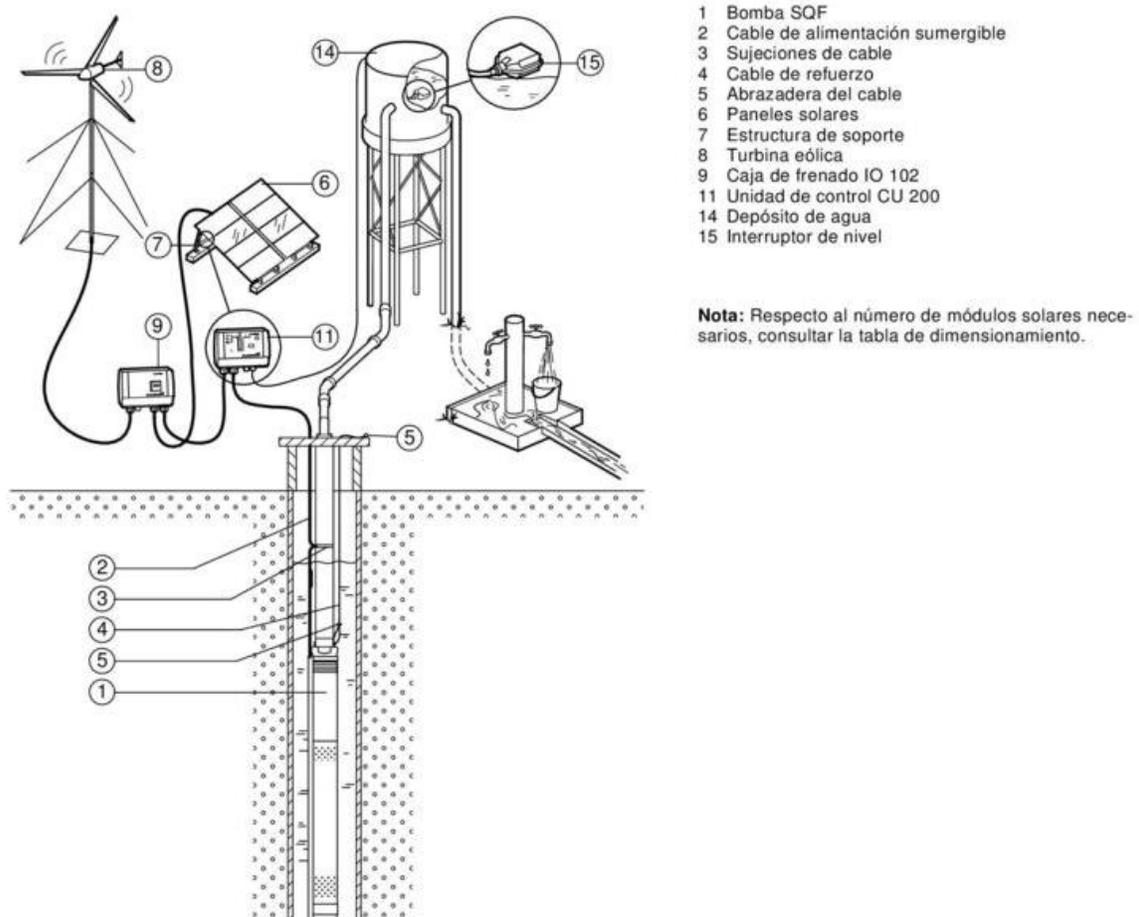


Figura 30. Instalación típica de un sistema híbrido de bombeo (Grundfos, 2018).

4.3.2. Caudal requerido

Teniendo en cuenta que la población de la comunidad es de 120 personas y en promedio una persona consume 3.8 metros cúbicos de agua mensuales, se necesitaría un reservorio de 456 metros cúbicos, como su tamaño es extremadamente grande lo que se hace en estos casos es un tanque de almacenamiento que tenga las dimensiones mínimas necesarias para el volumen de agua por día, por lo tanto se divide el caudal total de 456 metros cúbicos entre 30 días que tiene un mes y así se obtiene un tanque mínimo de 15.2 metros cúbicos. Por lo tanto, la idea principal en un sistema de bombeo es que la bomba trabaje en lapsos de tiempo continuos para evitar que los componentes mecánicos de la bomba se atasquen y tener un intercambio de agua constante en el tanque para evitar la contaminación de esta, por lo tanto, se debe usar una bomba de agua capaz de entregar un caudal que satisfaga la demanda de 15.2 metros cúbicos de agua diarios. El dimensionamiento

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

del equipo depende del caudal máximo que suministre la bomba a una altura dinámica total por el número de horas de trabajo.

4.3.3. Tanque de almacenamiento

El tanque de almacenamiento de agua o reservorio es el encargado de almacenar el agua bombeada, este tanque debe estar lo suficientemente cerca al bombeo y, además, a una altura mayor a la de los hogares de la población para llevar el fluido a las casas por medio de la gravedad u otro sistema de bombeo adicional. Para efectos del presente trabajo se estima que el tanque de almacenamiento tiene una capacidad total de 20 metros cúbicos.

4.3.4. Diámetro de la tubería de descarga

A continuación, se realiza el cálculo del diámetro de descarga de la bomba. Cabe resaltar que este diámetro es el mínimo requerido para un óptimo funcionamiento del sistema, no obstante, este diámetro no es el ideal, ya que, se deben respetar los diámetros comerciales de succión y descarga de la bomba, incluso, la mayoría de los fabricantes recomiendan aumentar estos diámetros para disminuir al máximo posible las pérdidas por fricción.

Diámetro interior en milímetros (D_{int}).

$$D_{int} = \sqrt{\frac{354(Q)}{v}} \quad (6)$$

Q = Caudal en m^3/h

v = velocidad del fluido en m/s (velocidad recomendada 1,3 m/s)

$$D_{int} = \sqrt{\frac{354(2)}{1,3}} = 23,33mm$$

Según el cálculo anterior se observa que el diámetro mínimo requerido para la tubería de descarga de la bomba es de 23.33 mm que equivale en tubería de PVC presión RDE 21 a $\frac{3}{4}$ de pulgada por lo tanto es un dato que beneficia la instalación de la bomba ya que se selecciona una tubería de descarga de $1 \frac{1}{2}$ pulgada.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Tuberías Presión PAVCO

RDE 9 PVC
Presión de Trabajo a 23°C: 500 PSI

RDE 11 PVC
Presión de Trabajo a 23°C: 400 PSI

RDE 13.5 PVC
Presión de Trabajo a 23°C: 315 PSI

RDE 21 PVC
Presión de Trabajo a 23°C: 200 PSI

Diámetro Nominal		Referencia	Peso	Diámetro Exterior Promedio		Espesor de Pared Mínimo		Diámetro Interior Promedio
mm	puíg.			mm	puíg.	mm	puíg.	
21	1/2	2900266	218	21.34	0.84	2.37	0.09	16.60
26	3/4	2900210	304	26.67	1.05	2.43	0.09	21.81
21	1/2	2902449	157	21.34	0.84	1.58	0.06	18.18
33	1	2900213	364	33.40	1.31	2.46	0.09	28.48
26	3/4	2900237	189	26.7	1.05	1.52	0.06	23.63
33	1	2900220	252	33.4	1.31	1.60	0.06	30.20
42	1.1/4	2900225	395	42.2	1.66	2.01	0.08	38.14
48	1.1/2	2902450	514	48.3	1.90	2.29	0.09	43.68
60	2	2902453	811	60.3	2.37	2.87	0.11	54.58
73	2.1/2	2900230	1185	73.0	2.87	3.48	0.14	66.07
88	3	2900233	1761	88.9	3.50	4.24	0.17	80.42
114	4	2900240	2904	114.3	4.50	5.44	0.21	103.42
168	6	2904616	5835	168.3	6.62	8.03	0.32	152.22

Tabla 3: Dimensiones de tubería PVC (PAVCO, 2014).

4.3.5. Cálculo de altura dinámica total

Se selecciona un diámetro para la tubería de 1^{1/2}", de acuerdo con este diámetro se realiza el cálculo de la altura dinámica total para conocer las pérdidas que se producen en la tubería debido a la fricción, accesorios y a las diferencias de altura.

$$\text{HDT} = \text{Altura dinámica total.}$$

Usando la ecuación (1)

$$\text{HDT} = H_{es} + H_{pfs} + H_{accesorios}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

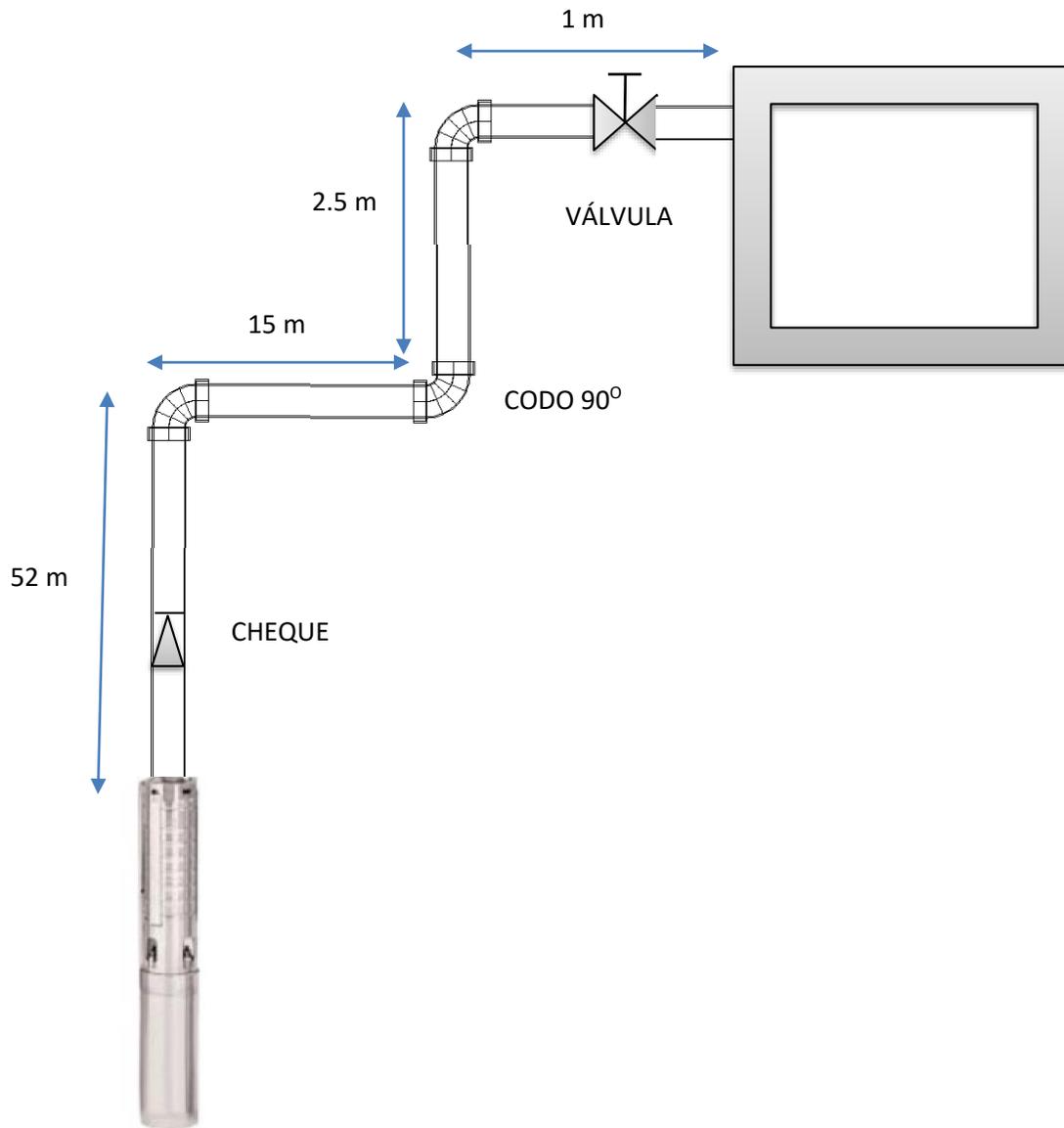


Figura 31. Esquema de instalación en sitio. Fuente: autores.

4.3.5.1. Cálculo de pérdidas en accesorios ($H_{accesorios}$) en tubería de $1^{1/2}$ ", según Tabla 1

Pérdidas en Válvula = 45ft

Pérdidas en Cheque = 11ft

Pérdidas en 3 codos 90° = $4,5\text{ft} \times 3 = 13,5\text{ft}$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$H_{\text{accesorios}} = \text{Pérdidas en Válvula} + \text{Pérdidas en Cheque} + \text{Pérdidas en Codos}$

$$H_{\text{accesorios}} = 45\text{ft} + 11\text{ft} + 13,5\text{ft} = 69,5\text{ft}$$

$$1\text{ft} = 0,3048\text{m}$$

$$69,5\text{ft} \times \frac{0,3048\text{m}}{1\text{ft}} = 21,18\text{m}$$

$$H_{\text{accesorios}} = 21,18\text{m}$$

4.3.5.2. Pérdidas por fricción

$$\text{longitud del sistema} = 52\text{m} + 15\text{m} + 2,5\text{m} + 1\text{m} = 70,5\text{m}$$

De acuerdo con la Tabla 2, teniendo el caudal en litros por segundo y el diámetro de la tubería en pulgadas se hallan las pérdidas tanto en los accesorios como por fricción en la tubería.

Pérdida de Presión

Según la ecuación de Hazen & Williams $H_f = 10 \cdot 64 \cdot Q^{1,852} / C^{1,852} \cdot D^{4,871}$ L: longitud igual a 1m Q: Caudal en l/s
 D: diámetro interno en mm CHw: Coeficiente de Hazen Williams para el PVC, 150

Pérdidas por Fricción m/m										Pérdidas por Fricción m/m							
Q	1/2" RDE		3/4" RDE		1" RDE		1.1/4" RDE	1.1/2" RDE	2" RDE	2.1/2" RDE		3" RDE					
l/s	9	13.5	11	21	13.5	21	21	21	21	26	21	26	21	26	32.5	41	21
0,1	0,0188	0,0184	0,0050	0,0034	0,0014	0,0010											
0,2	0,0679	0,0663	0,0180	0,0122	0,0049	0,0037											
0,3	0,1437	0,1404	0,0380	0,0257	0,0104	0,0078	0,0025	0,0022									
0,4	0,2448	0,2391	0,0648	0,0438	0,0177	0,0133	0,0043	0,0033									
0,5	0,3698	0,3613	0,0979	0,0662	0,0267	0,0201	0,0064	0,0047									
0,6	0,5182	0,5062	0,1371	0,0928	0,0374	0,0281	0,0090	0,0062	0,0021	0,0019							
0,7	0,6892	0,6733	0,1824	0,1235	0,0497	0,0374	0,0120	0,0079	0,0027	0,0024							

Tabla 4. Pérdidas de presión (PAVCO, 2014).

$$H_{\text{accesorios}} = 21,18\text{m} \times 0,0062 = \mathbf{0,1313\text{m}}$$

$$H_{\text{pfs}} = 70,5\text{m} \times 0,0062 = \mathbf{0,4371\text{m}}$$

$$H_{\text{es}} = 52\text{m} + 2,5\text{m} = \mathbf{54,50\text{m}}$$

$$\text{HDT} = 54,5\text{m} + 0,4371\text{m} + 0,1313\text{m}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

HDT = 55,0684m

4.3.6. Cálculo de potencia demandada de la bomba

Potencia demandada de la bomba en HP.

$$P = \frac{Q \times \text{HDT}}{3450 \times \eta} \quad (7)$$

Donde:

P: Potencia demandada.

Q: Caudal en gpm.

HDT: Altura dinámica total en ft.

η : Eficiencia.

$$P = \frac{8,7 \times 116,46}{3450 \times 0,6}$$

$$P = 0,48\text{HP} = 358,08\text{W}$$

Comercialmente no se encuentra una bomba con una potencia de estas características, por consiguiente, se recomienda implementar una bomba mayor a 0,75HP, cabe resaltar que esta potencia es teórica y no se tienen en cuenta las pérdidas que un motor eléctrico acoplado a una bomba puedan generar, dicho dato es un estimado a tener en cuenta para la selección de un equipo de bombeo, por lo tanto, se sugiere no seleccionar una bomba menor a la potencia antes obtenida. También es de resaltar que la potencia en paneles solares está dada en vatios, por lo cual se hace la conversión de potencias.

$$1\text{HP} = 746\text{W}$$

Entonces

$$0,75\text{HP} \times \frac{746\text{W}}{1\text{HP}} = 560\text{W}$$

4.3.7. Selección de la bomba

Teniendo en cuenta las condiciones de instalación, el punto hidráulico de operación requerido y la potencia teórica necesaria se procede a buscar comercialmente equipos de bombeo que puedan satisfacer dicha necesidad, actualmente existe un amplio portafolio en bombas y cada una con

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

múltiples cualidades, así que para la elección de este sistema de bombeo debemos contemplar los siguientes parámetros:

- HDT requerida: 55.06 m
- Caudal requerido: $2m^3/h$
- Potencia teórica mínima requerida: 358.08 W
- Diámetro de descarga mínimo: 1"
- Bomba tipo lapicero para pozo de 6" de diámetro
- Precio
- Líquido por bombear: agua subterránea
- Temperatura de líquido: 22°C
- Voltaje (ver nota1)

Para la selección de la bomba se debe tener en cuenta el tipo de alimentación eléctrica que maneja, debido a que podemos encontrar en el mercado bombas que cumplan con los ítems anteriores pero este parámetro, será el de mayor peso en la decisión de compra, debido a que el tipo de alimentación eléctrica influye si es necesario añadir otros componentes a la instalación. Para el caso en específico existen bombas trifásicas a 220 V / 440 V, bombas monofásicas 120 V/ 220V y bombas con motores universales.

El sistema híbrido de bombeo básico se compone de una bomba, paneles solares, turbina eólica y tablero de control. A continuación se presentan algunos aspectos importantes de cada uno de estos: Los paneles solares brindan alimentación eléctrica en corriente continua DC, compuestos por un sistema trifilar que consisten en un polo positivo, un polo negativo y una línea de tierra, por otra parte las turbinas eólicas ofrecen un sistema trifásico de corriente alterna AC más una línea de tierra, la mayoría de los proveedores de turbinas eólicas incorporan un convertidor AC/DC para estandarizar la implementación de turbina eólica con paneles solares. Así existe la posibilidad de trabajar en corriente continua o en corriente alterna, pero realmente la ficha técnica de la bomba es la que define el tipo de alimentación que se puede usar. Dado el caso en que la alimentación de la bomba sea tipo corriente alterna, se debe adicionar un convertidor de DC/AC para los paneles solares y un regulador de voltaje para mantener los niveles de voltaje y de corriente en los valores predeterminados de la bomba, así mismo tendría la desventaja de implementar una tercera fase adicional ya que el generador eólico entrega alimentación trifásica y los paneles solares alimentación monofásica, además, se debe agregar un sistema para que permita el sincronismo de las dos fuentes posibles de alimentación eléctrica AC. Como se puede observar, la implementación de una bomba tipo lapicero en corriente alterna sea trifásica o monofásica es posible, pero se debe considerar que el uso de esta conlleva a adicionar nuevos elementos de instrumentación y, por consiguiente, eleva los costos del sistema.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para efectos de simplicidad y confiabilidad del sistema es mucho más recomendable el uso de bombas tipo lapicero con motores universales, ya que, este tipo de motor puede funcionar con corriente alterna o corriente continua en los siguientes rangos:

- 30 – 300 VDC
- 1 x 90 – 240 V – 10% / + 6%, 50/60 Hz

Este rango de voltajes permite trabajar en dos sistemas diferentes, dando una opción altamente atractiva desde el punto de vista de la postventa, ya que, la confiabilidad del sistema aumenta debido a que, en cuanto a variaciones de voltaje, la bomba podrá asumir estos cambios sin haber grandes repercusiones en el sistema. Otro plus adicional es que, ante cualquier eventualidad de las fuentes de alimentación definidas en el sistema híbrido, la bomba podrá ser conectada a un tercer suministro eléctrico, llámese operador de red, planta eléctrica, gas, diésel o gasolina, sin verse afectado el abastecimiento de agua para la comunidad.

4.3.8. Curva hidráulica

La curva hidráulica es la relación entre la altura dinámica total expresada en metros versus el caudal expresado en metros cúbicos por hora. Para determinado punto de la gráfica, a medida que se incrementa la cabeza de la bomba, es menor el caudal capaz de suministrar el equipo; así mismo permite conocer la potencia requerida para diferentes puntos hidráulicos. Esta curva hidráulica es única para cada modelo y es la encargada de seleccionar el punto de operación de la bomba, para el caso en específico cabe recordar que los puntos hidráulicos requeridos para el sistema híbrido de bombeo son:

- HDT 55.06 m
- Potencia teórica mínima de 560 W
- Caudal requerido 2 metros cúbicos hora
- Diámetro teórico mínimo de descarga de 23 mm

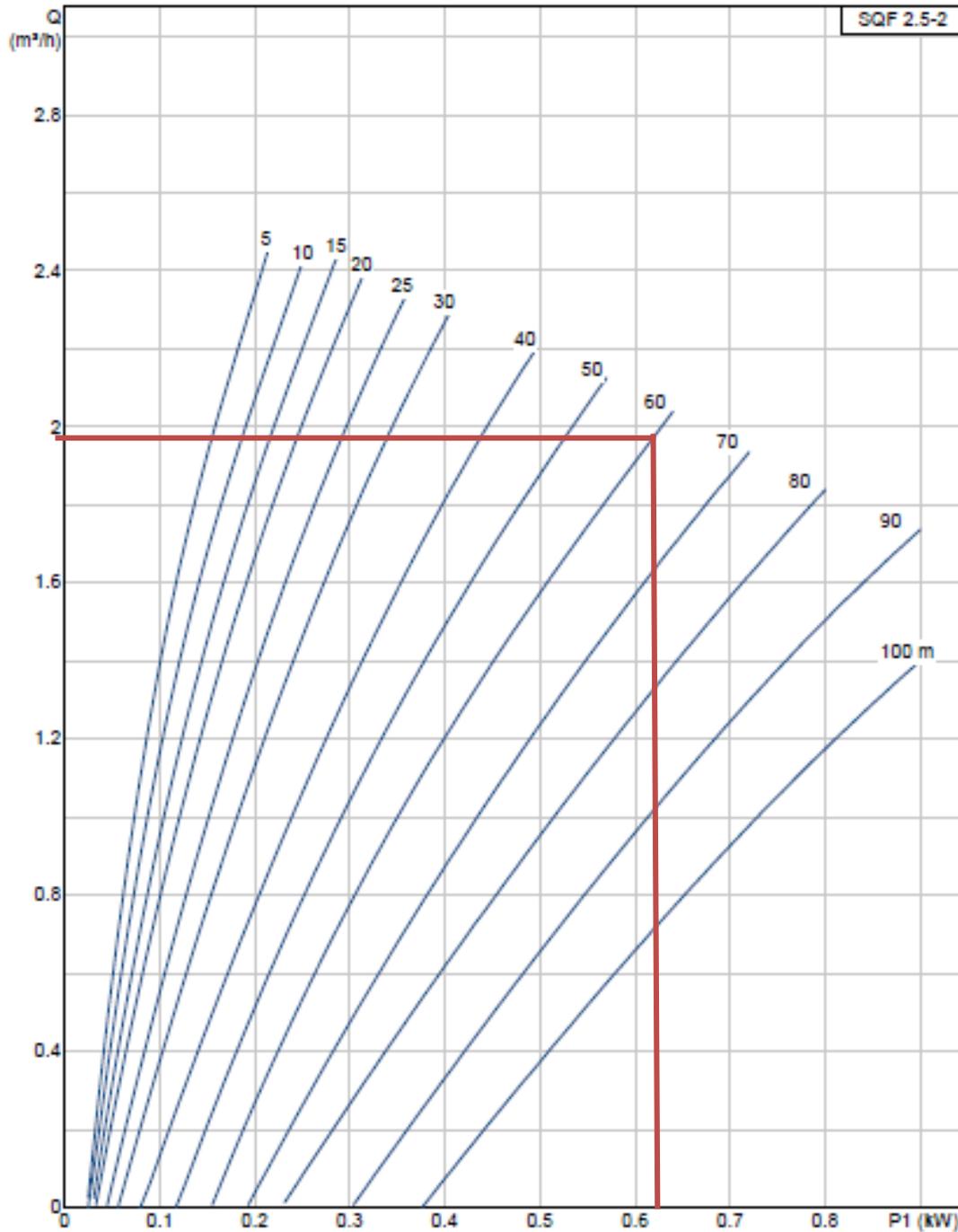


Figura 32. Curva hidráulica bomba sumergible SQF 2.5-2 (Grundfos, 2018).

En la Figura 32, se observa que, para los parámetros de diseños requeridos en la instalación del sistema híbrido de bombeo, el modelo de bomba SQF2.5-2 de Grundfos cumple perfectamente la necesidad de dicho punto hidráulico solicitado, siendo esta capaz de entregar un poco más de la

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

HDT al caudal solicitado, a su vez, el diámetro de descarga es mayor que el requerido, lo cual disminuye las pérdidas por fricción en la tubería desde la salida de la bomba. La potencia teórica difiere un poco a la potencia solicitada por el fabricante, esto es debido a que existen pérdidas en la transmisión del movimiento del rotor del motor a los impeler de la bomba, cabe aclarar que no es una máquina con una eficiencia del 100%, pero la potencia requerida es admisible para el cálculo del sistema.

Para efectos del presente trabajo se selecciona una bomba tipo lapicero SQF 2.5 – 2 ver Figura 32, marca Grundfos de las siguientes características brindadas por el fabricante:



Figura 33. Bomba SQF 2.5-2 (Grundfos, 2018).

4.3.7.1. Aplicación

Las bombas sumergibles con motores universales son una solución ecológicamente responsable para el suministro de agua. Este tipo de bombas incorporan un motor de imanes permanentes que permite utilizar de manera eficiente la energía procedente de fuentes naturales. Este sistema de bombeo constituye una solución idónea para el suministro de agua en zonas de difícil acceso en las que esta escasea y el suministro eléctrico es inexistente o poco fiable (Grundfos, 2018).

Los paneles solares y las turbinas eólicas permiten adaptarse a las condiciones climáticas existentes en cualquier lugar. La energía generada sobrante puede almacenarse en un sistema de baterías de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

reserva para poder utilizarla cuando no se pueda extraer energía de las fuentes naturales (Grundfos, 2018).

4.3.7.2. Usos

Los sistemas con energías renovables pueden utilizarse para aplicaciones en lugares de difícil acceso:

- Pueblos, escuelas, hospitales y pequeñas viviendas.
- Granjas e irrigación de invernaderos.
- Parques de ocio y granjas escuelas.
- Parques naturales.

4.3.7.3. Características y ventajas

- Suministro de energía renovable: paneles solares o turbinas eólicas.
- Sistemas electrónicos incorporados y fácil instalación.
- Suministro fiable de agua.
- Bajos costos de funcionamiento.
- Protección contra marcha en seco (Grundfos, 2018).

4.3.7.4. Especificaciones

Producto:	SQF 2.5-2
Etapas	2
Bomba	Acero inoxidable
Máxima presión ambiental	15 bar
Descarga	Rp 1 1/4
Diámetro mínimo de la perforación	76 mm
Líquido bombeado	Agua
Temperatura máxima del líquido	40 °C
Potencia de entrada - P1	1.4 kW

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tensión nominal ac	1 x 90-240 V
Tensión nominal dc	30-300 V
Corriente nominal	8.4 A
Factor de potencia	1.0
Velocidad nominal	500-3600 rpm
Tipo de arranque	directo
Grado de protección (IEC 34-5)	IP68
Clase de aislamiento (IEC 85)	F
Protección del motor	Y
Peso bruto	11.3 kg

Dimensiones en mm

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

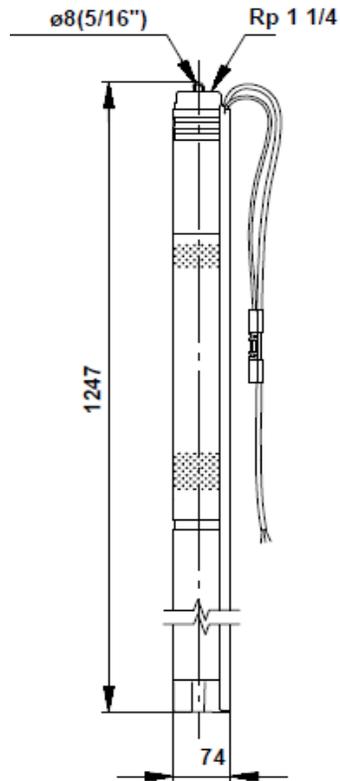


Figura 34. Dimensiones bomba SQF 2.5-2 (Grundfos, 2018).

Diagrama de conexión eléctrica

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

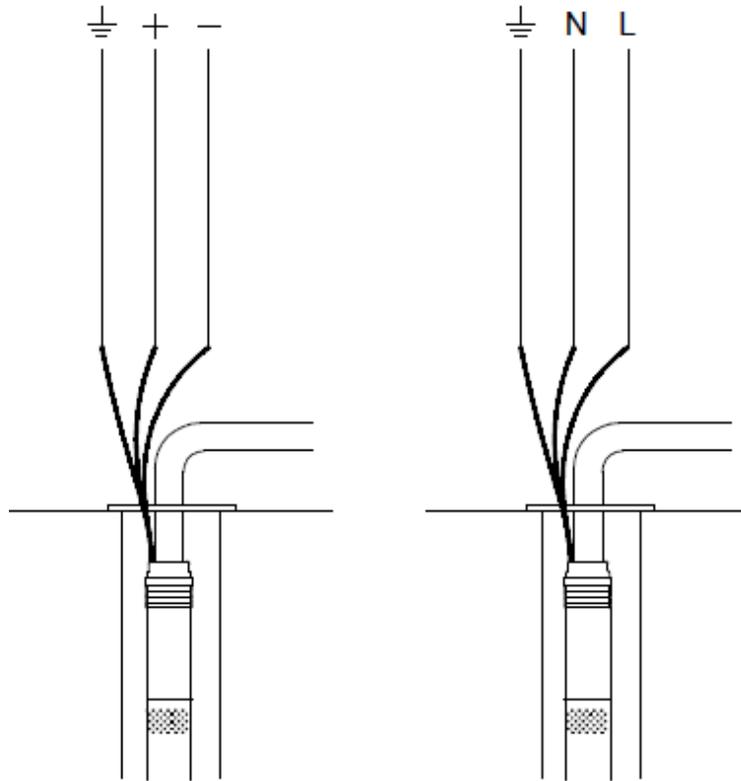


Figura 35. Cables de conexión eléctrica bomba SQF 2.5-2 (Grundfos, 2018).

4.4. Cálculo potencia de turbina eólica

Usando la siguiente ecuación se halla la potencia del viento que atraviesa las palas de la turbina eólica. De esa potencia total solo se transforma en energía eléctrica un porcentaje menor al 59%.

$$P_{\text{Aire}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{aire}} (A) (v)^3$$

Donde

P_{Aire} es la potencia del aire que pasa a través del rotor de la turbina.

ρ_{aire} es la densidad del aire en kg/m^3 . ($1,225\text{kg/m}^3$)

v es la velocidad del viento en m/s . (6m/s)

A es el área que barre el rotor de la turbina en m^2

$$A = \pi \cdot r^2$$

Donde r es el radio del rotor de la turbina eólica.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para determinar la potencia eléctrica que se genera en la turbina eólica, es necesario conocer su eficiencia aerodinámica o coeficiente de rendimiento (c_p), este coeficiente indica el porcentaje de la potencia del aire que se transforma en potencia eléctrica, generalmente este coeficiente no supera el 0,59. Para esta turbina el coeficiente de rendimiento es 0,5.

$$P_{Turbina} = \frac{1}{2} \rho_{aire} (A) (v)^3 (c_p)$$

$$P_{Turbina} = \frac{1}{2} (1,225) (\pi (2,7/2)^2) (6)^3 (0,5)$$

$$P_{Turbina} = 378,74W$$

En el cálculo de la potencia eólica, se utiliza una turbina eólica de la marca americana Southwest Windpower. El nombre de la turbina es Whisper 200, una turbina eólica especial para este tipo de aplicaciones, la cual puede brindar una potencia significativa con una velocidad del viento relativamente baja. Especificaciones técnicas en Tabla 5.



Figura 36. Turbina eólica Whisper 200 (Southwest Windpower, 2008).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.4.1 Especificaciones técnicas

Tabla 5. Especificaciones técnicas de turbina eólica. (Southwest Windpower, 2008)

Especificaciones	Valor
Diámetro del rotor	9 pies (2.7 m)
Velocidad de viento de arranque	7 mph (3.1 m / s)
Voltaje	24, 36, 48 VDC.
Potencia nominal	1000 vatios a 26 mph (11.6 m / s)
Controlador de Turbina	Controlador Whisper
Cuerpo	Opción fundición de aluminio
Cuchillas	Fibra de vidrio reforzada con 3 carbonos

4.4.2 Curva de potencia

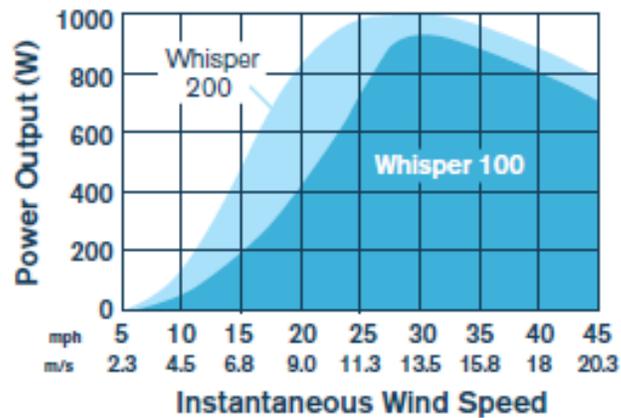


Figura 37. Curva de potencia de la turbina eólica (Southwest Windpower, 2008).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.5. Cálculo de paneles solares

$$P_{Bomba} = 650W$$

Debido a que la turbina eólica suministra más de la mitad de la potencia eléctrica para la bomba, la potencia requerida en los paneles solares es menor.

$$P_{Requerida} = 300W$$

De acuerdo con el aforo calculado anteriormente, se calcula el tiempo de trabajo diario de la bomba hidráulica y por consiguiente de los paneles solares.

Tiempo de trabajo diario = 8 horas.

Se calcula la energía diaria que los paneles solares deben entregar a la bomba.

Energía requerida diaria = Potencia requerida \times horas de trabajo diario

$$\text{Energía requerida} = 300W \times 8h/\text{día}$$

$$\text{Energía requerida} = 2400Wh/\text{día}$$

Luego, con la radiación solar promedio de la zona afectada se calculan las horas pico sol (HPS).

$$\text{Radiación solar} = 5,7 \text{ kWh}/m^2$$

$$\text{Horas pico sol (HSP)} = \frac{\text{Radiación solar}}{1kWh/m^2}$$

En este caso se utilizan paneles solares de 300 W, con esta información se halla el número de módulos necesarios para satisfacer la demanda energética de la bomba.

$$\text{Número de módulos} = \frac{\text{Energía requerida}}{\text{HPS} \times \text{Rendimiento} \times W_p}$$

$$\text{Número de módulos} = \frac{2400Wh}{5,5h \times 0,75 \times 300W}$$

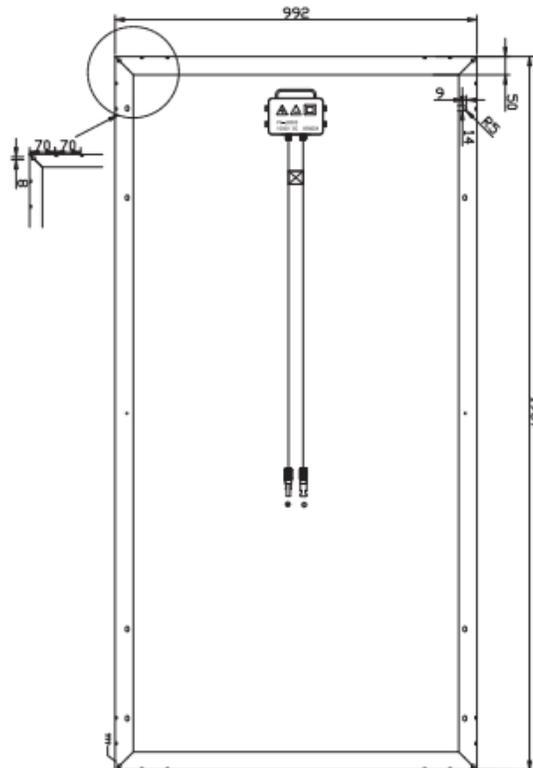
$$\text{Número de módulos} = 1,93$$

Consiguiente al cálculo del número de módulos se elige un tipo de panel, que garantice la potencia necesaria y que pueda acoplarse a todo el sistema híbrido (Ver Figuras 38 y 39).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 38. Imagen del panel solar usado (Simax, 2018).



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Figura 39. Plano de panel solar (Simax, 2018).

Tabla 6. Ficha técnica del panel solar (Simax, 2018).

Solar cell	Polycrystalline silicon 156 x 156 (mm)
No. Of cells	72 (6 x 12)
Dimensions	1956 x 992 x 40 mm
Weight	22,5 kg
Front Glass	3,2 mm (0,13 inches) tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy

Tabla 7. Características eléctricas del panel solar (Simax, 2018).

Parameters	SP672-300
Peak power (W_p) P_{mpp}	300W
Open circuit voltaje (V) V_{oc}	45.0
Maximum power voltage (V) (V_{mpp})	36.3
Maximum power Current (A) (I_{mpp})	8.26
Short circuit Current (A) (I_{sc})	8.93
Power Tolerance	0 ~ + 3%
Module Efficiency (%)	15.5%

Las Tablas 6 y 7 muestran todas las especificaciones técnicas, eléctricas y demás características de un panel solar, especial para este tipo de aplicaciones.

4.6. Dispositivos de control y potencia

Los elementos de control son necesarios para operar de forma automática y manual, los componentes de potencia que intervienen en el sistema híbrido de bombeo. Elementos como los paneles solares y la turbina eólica son los encargados de suministrar la energía eléctrica para dar

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

funcionamiento a la motobomba tipo lapicero, pero esta conexión no se hace de forma directa al motor de la bomba, sino que debe ser a través de un tablero de control. El tablero de control permite la operación en manual, automático y apagado del sistema, además cuenta con un piloto de alarma e indicación de operación de la bomba transportando fluido, este modelo de operación puede realizarse bajo lógica cableada junto con la combinación de circuitos electrónicos reguladores de potencia o con controladores específicos que existen actualmente en el mercado. Los controladores (IO 102 y CU200) hacen parte del conjunto de sistema híbrido de bombeo y simplifican la conexión del sistema y la maniobrabilidad por el usuario.

4.6.1. Controlador IO102

El controlador IO102 (Figura 40), está específicamente diseñado para los sistemas eólicos, este habilita el arranque y parada manual de la bomba en un sistema eólico o combinado. El interruptor del arranque/parada tiene un freno eléctrico incorporado para la turbina. Cuando el interruptor está en la posición "parada", la turbina se detiene o reduce la velocidad. El IO 102 rectifica el voltaje de la turbina eólica trifásica AC a voltaje DC. Además, habilita la combinación de energía eólica con la del panel solar. Al mismo tiempo, este controlador también funciona como una caja de conexión de todos los cables necesarios (Grundfos, 2018).



Figura 40. Caja de control IO 102 (Grundfos, 2018).

4.6.1.1. Especificaciones técnicas

Rango de temperaturas ambientes: -30 a 50 °C

Frecuencia de alimentación: 60 Hz

Tensión nominal: 1 x 240 VAC - 15%/+10%

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Grado de protección: IP55

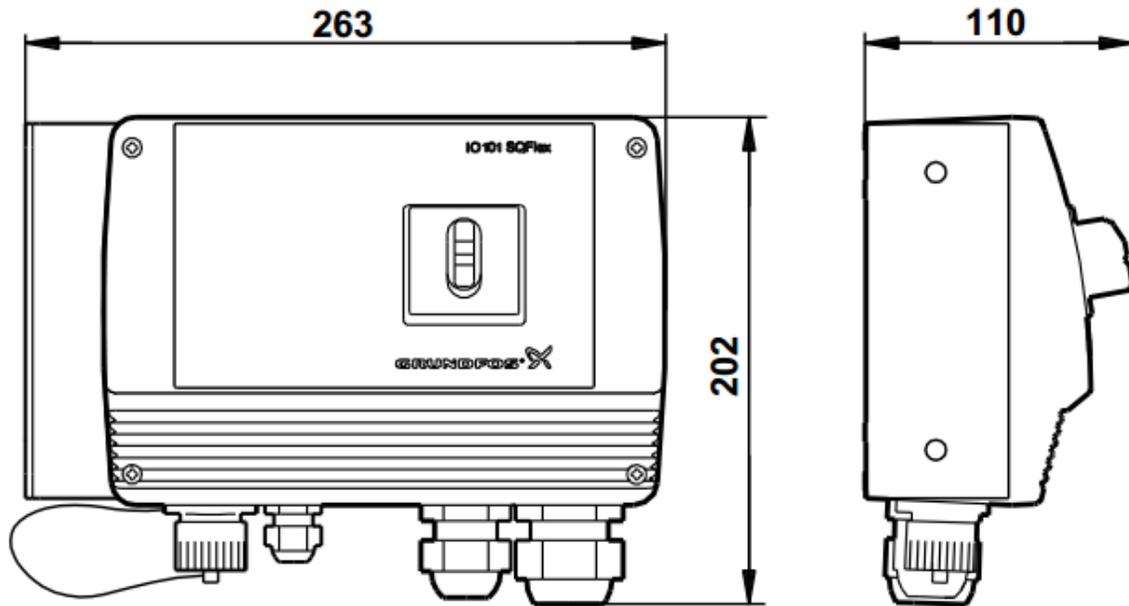
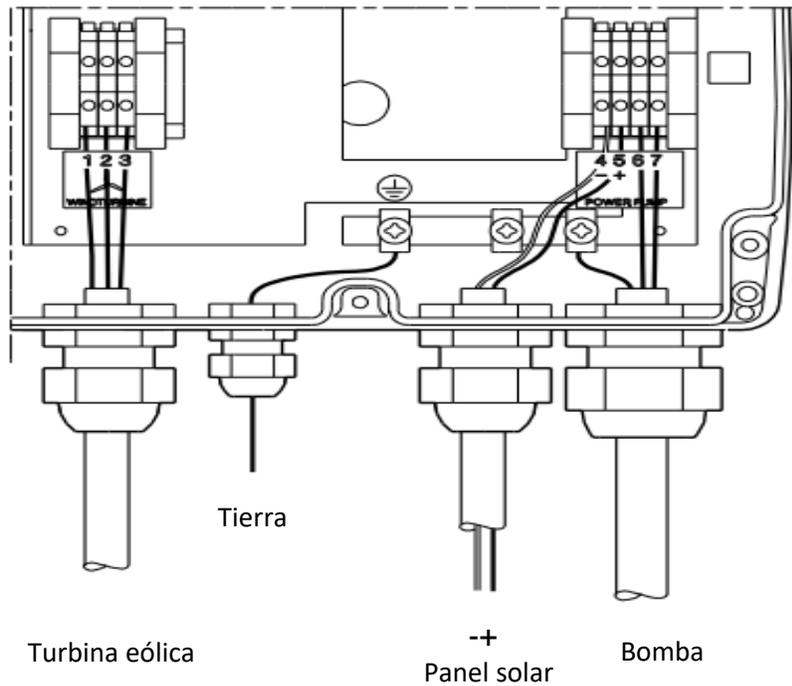


Figura 41. Dimensiones caja de control IO 102 (Grundfos, 2018).



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Figura 42. Conexión eléctrica (Grundfos, 2018).

4.6.2. Controlador CU 200

La unidad de control CU 200 es una unidad combinada de estado, control y comunicación especialmente desarrollada para el sistemas solares y eólicos. Además, dispone de una conexión para un interruptor de nivel.

La unidad de control CU 200 ofrece:

- conexión de suministro de potencia
- conexión de bomba
- conexión de tierra
- conexión de interruptor de nivel
- Visualización en monitor del sistema
- Indicación de alarma.
- El tanque está lleno (interruptor de nivel)
- La bomba está funcionando
- Entrada de potencia
- Funcionamiento en seco
- No hay contacto con la bomba
- Sobre voltaje
- Sobre temperatura
- Sobrecarga
- Insuficiente suministro de energía

Adicionalmente, el controlador CU 200 muestra los símbolos de las opciones de suministro de energía. (Grundfos, 2018)



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Figura 43. Caja de control CU 200 (Grundfos, 2018).

Especificaciones:

Rango de temperaturas ambiente: 30 a 50 °C

Consumo de potencia: 5 W

Tensión nominal AC: 1 x 90-240 V

Tensión nominal DC: 30-300 V

Grado de protección: IP55

Peso neto: 2 kg

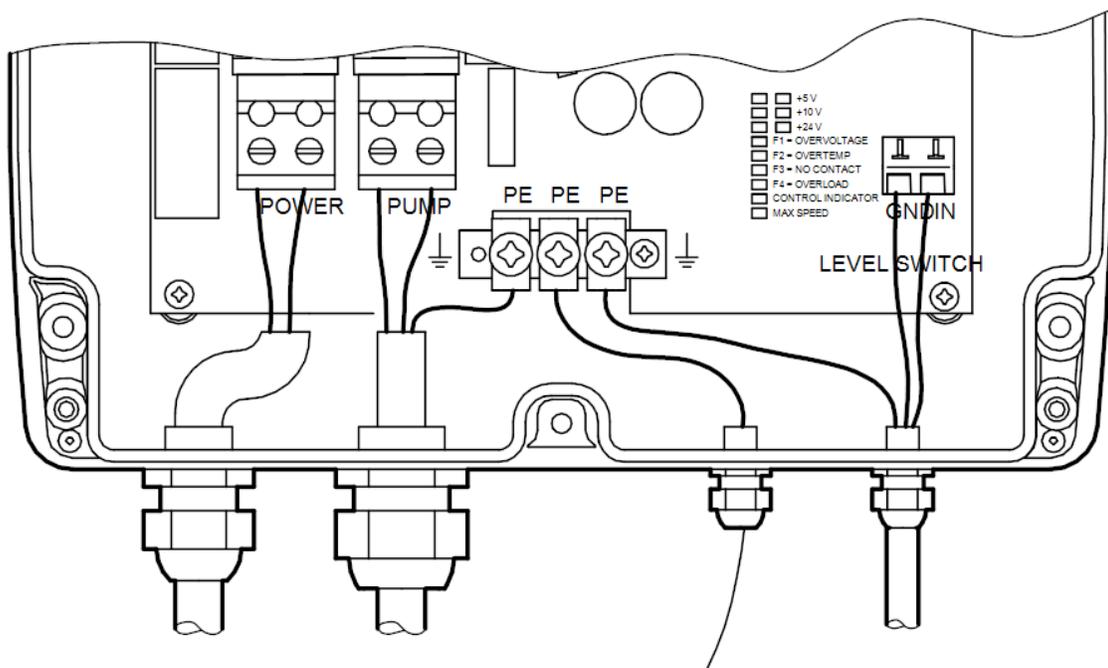


Figura 44. Conexión eléctrica CU 200 (Grundfos, 2018).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez seleccionados los componentes eléctricos y mecánicos del sistema híbrido de bombeo, se procede con la instalación de los mismos en sitio, para dicha instalación además de contar con los dispositivos a instalar, es fundamental verificar las condiciones mínimas del lugar como lo son: la ubicación del tanque de almacenamiento de agua, la perforación del pozo con mortero para anclajes, distribución de tubería eléctrica y PVC, personal de trabajo y estructura para el soporte de la turbina eólica y paneles solares. A continuación, se presenta el ensamble de los elementos del sistema.



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Figura 45. Ensamble de turbina eólica (Durespo S.A, 2010).



Figura 46. Pozo perforado (Durespo S.A, 2010).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 47. Tanque de almacenamiento 20 metros cúbicos. Fuente: autores.



Figura 48. Cajas de control IO 102 y CU 200 respectivamente (Durespo S.A, 2010).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 49. Paneles solares (Durespo S.A, 2010).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 50. Ensamble completo sistema híbrido de bombeo (Durespo S.A, 2010).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Después de realizado el ensamble del sistema en la comunidad Wayuu sector Santa Ana Guajira se pone en marcha del equipo de bombeo, la secuencia de arranque del sistema hibrido de bombeo básicamente consiste en:

- Verificar que el contacto del sensor de nivel de agua que posee la bomba tipo lapicero se encuentre normalmente cerrado, esto con el fin que antes de dar arranque al equipo se garantice que la bomba se encuentre embebida en el agua y evitar la marcha en seco.
- Liberar el freno mecánico que posee la turbina eólica y verificar el sentido de rotación de los alabes con el movimiento natural del viento.
- Chequear con un voltímetro la generación de voltaje tanto de los paneles solares como de la turbina eólica.
- Cerrar el circuito de los paneles solares a través de un interruptor de dos posiciones ubicado en la caja de control IO102.
- Encender la caja de control CU 200 para finalmente entregar la potencia eléctrica a la bomba.
- Verificar visualmente el suministro de agua al tanque de almacenamiento.
- Inspeccionar fugas en la tubería PVC de presión.
- Verificar controles de nivel de llenado del tanque para la parada y re arranque del sistema.
- Verificación del punto hidráulico de la curva de bombeo.

Consiguiente a esta serie de pasos se realiza un aforo a la entrada del tanque de almacenamiento de agua para conocer el caudal suministrado por la bomba y calcular el tiempo aproximado del llenado por completo del tanque, este aforo se realiza de forma manual con la utilización de un beaker volumétrico de 1 litro y se toma el tiempo de llenado, así se obtiene la cantidad de litros por segundo que suministra la bomba. Cabe resaltar que este aforo tiene variaciones debido a que el suministro de potencia eléctrica no es proveniente de un operador de red, sino de los recursos naturales de la zona geológica seleccionada, entonces el sistema presenta variaciones en las medidas de caudal, ya que, la potencia eléctrica depende de la radiación solar y la velocidad del

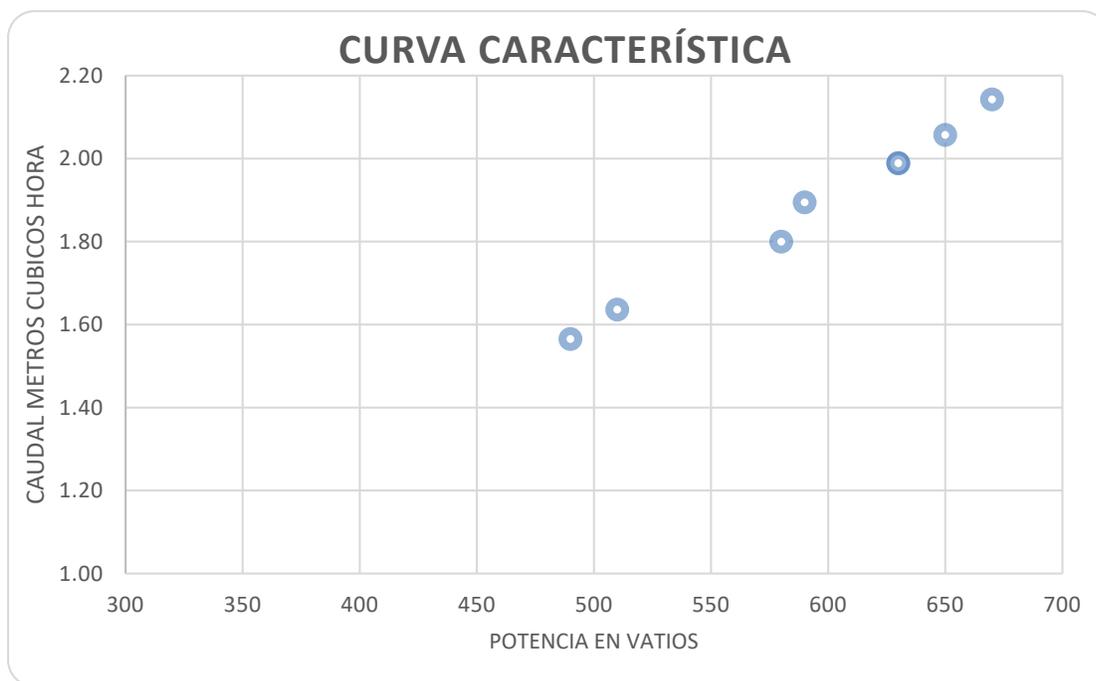
	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

viento; para un mejor estudio del comportamiento de la bomba se realiza la Tabla 8, con la toma de valores en diferentes horas del día.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 8: Mediciones en sitio. Fuente: autores.

HORA DEL DIA	TIEMPO (S) PARA LLENAR UN LITRO	LITROS/SEGUNDO	m ³ /h	HDT (m)	VARIACIÓN APROXIMADA DE POTENCIA SEGÚN CURVA HIDRAULICA DE LA BOMBA. (W)
6:00	3	0,33	1,20	55,06	390
7:00	2,8	0,36	1,29	55,06	400
8:00	2,75	0,36	1,31	55,06	410
9:00	2,5	0,40	1,44	55,06	465
10:00	2,3	0,43	1,57	55,06	490
11:00	2	0,50	1,80	55,06	580
12:00	1,81	0,55	1,99	55,06	630
13:00	1,81	0,55	1,99	55,06	630
14:00	1,75	0,57	2,06	55,06	650
15:00	1,68	0,60	2,14	55,06	670
16:00	1,9	0,53	1,89	55,06	590
17:00	2,2	0,45	1,64	55,06	510
18:00	2,72	0,37	1,32	55,06	430



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Figura 51. Curva característica de Caudal Vs Potencia. Fuente: autores.

Como se puede observar en la Tabla 8, el caudal varía con respecto a la potencia suministrada por los paneles y la turbina, claramente se nota que en las primeras horas de la mañana no se tiene un buen suministro eléctrico debido a la baja velocidad de los vientos y la radiación solar, también se observa que la hora del día con mayor eficiencia es alrededor de las 3:00 pm, por lo tanto según los diseños del sistema, el equipo opera en turnos diarios de 8 horas y para efectos del presente proyecto se recomienda periodos de trabajo entre las 10:00 am y las 5:00 pm, con el fin de aprovechar los índices máximos de potencia. Cabe resaltar que el funcionamiento del equipo depende de la demanda del tanque de almacenamiento. La bomba durante un turno de trabajo puede tener varios encendidos y apagados del sistema, dependiendo de la posición de la flota de nivel del tanque de llenado. Así mismo se estima un tiempo promedio de 11 horas para el llenado inicial del tanque completamente desde 0 a 100%, se estima que el bombeo en esta fase inicial tiene un tiempo promedio de trabajo de 11 horas, el cual puede realizarse en dos turnos de trabajo, uno por día, también en este proceso inicial se realiza un monitoreo constante para observar el correcto funcionamiento de la bomba. Cuando el tanque se llene completamente, se calibra la flota de nivel para evitar el rebose de este y graduar la longitud del cable del sensor para el encendido en automático, en otras palabras, esta flota se encarga del encendido y apagado de la bomba entre los niveles del 60% y el 100% de la capacidad del tanque. Así los periodos de trabajo de la bomba podrán disminuir debido a que el volumen que deberá abastecer pasará a ser de 8 metros cúbicos, lo cual permite contar siempre con una reserva de 12 metros cúbicos en el tanque de almacenamiento y unos periodos de llenado más cortos. Cabe resaltar que los tiempos de encendido y apagado de la bomba dependen siempre del consumo que tenga la comunidad y solo podrá ser diagnosticado con un histórico de funcionamiento por periodos anuales; ya que, al ser poblaciones de bajos recursos no se puede predecir la habitabilidad de la comunidad y los periodos de permanencia y consumo de agua en la zona.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

6. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- El sistema híbrido de bombeo presenta pruebas altamente satisfactorias en cuanto al abastecimiento de agua para comunidades remotas, debido a que los aldeanos ya no tienen que desplazarse largas distancias para la obtención de este recurso hídrico, por tal motivo la comunidad recibe este equipo de forma gratificante a pesar de que su eficiencia no es tan alta comparado a otros sistemas de bombeo que pueden ser abastecidos por operadores eléctricos del país; sin embargo, los recursos naturales con los que actualmente cuenta la zona, son suficientes para la aplicación de energías renovables y adquirir este servicio de forma gratuita.

- El sector de Santa Ana ubicado en la Guajira es una zona del país donde actualmente en muchas comunidades indígenas y poblaciones aledañas escasea el servicio de agua potable para los habitantes de la región, pero también son zonas que a pesar de no contar con fuentes de aguas naturales poseen otras riquezas como lo son los altos índices de radiación solar y los fuertes vientos que circulan a bajas alturas, por lo tanto se convierten en lugares atractivos para la implementación de las energías renovables y montajes de sistemas híbridos de bombeo que satisfacen la necesidad del recurso hídrico sin tener que utilizar un operador de red eléctrica.

- El estudio topográfico y demás variables en la zona afectada arrojan resultados concluyentes acerca de la viabilidad, ya que, el sitio cuenta con todas las condiciones adecuadas para dar vía libre al proyecto. Tanto la presencia de un acuífero como la suficiente radiación solar y velocidad del viento hacen que el sistema funcione en perfectas condiciones.

- El suministro de agua potable a través del sistema híbrido de bombeo tiene limitantes al depender de un acuífero confinado y no ser una fuente de agua abierta y de grandes caudales,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

por lo tanto, se debe respetar el aforo que entrega el estudio topográfico para no afectar la vida útil del pozo y no tener problemas por derrumbamiento interno del pozo al sobrepasar el consumo de dos litros por segundo que es lo recomendado en el estudio realizado en la zona.

- Debido a que la comunidad wayuu se encuentra ubicada en una zona geográfica estratégica para el uso de sistemas con energías renovables, y basándose en el estudio topográfico, se implementa el proyecto, arrojando resultados satisfactorios y beneficiando a 40 familias con la obtención de este líquido preciado.

- El presente proyecto se realiza bajo una tasa de población definida y con un aforo máximo de dos litros por segundo, las calibraciones del equipo permiten un consumo no mayor a un litro por segundo pensando que la población a futuro puede crecer al aumentar el número de hijos en las familias o al recibir miembros de otras tribus, también se debe tener en cuenta que la cantidad de recurso hídrico puede variar según la época del año, puede aumentar en el invierno pero también disminuir significativamente en el verano, es por estas razones que el pozo contempla un factor de consumo doble al que posee actualmente la población y esto se hace con el fin de aumentar la confiabilidad en el sistema y poder garantizar este servicio durante todo el año, también en caso de aumentar la demanda del agua se puede aumentar las horas de trabajo del equipo pero a su vez aumenta los mantenimientos preventivos y correctivos de los componentes del sistema.

- A futuro es recomendable realizar un estudio topográfico anualmente para conocer cómo han cambiado las condiciones del pozo y poder aumentar o disminuir las calibraciones del sistema híbrido de bombeo, ya que, al ser este equipo un sistema modular, puede aumentarse el número de paneles solares y tener mayores potencias para fortalecer el bombeo en caso de que el estudio permita consumir más agua del acuífero sin afectar el aforo de este.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

- ALVAREZ, J., & TARGARONA, J. (2011). GENERACIÓN EÓLICA EMPLEANDO DISTINTOS TIPOS DE GENERADORES CONSIDERANDO SU IMPACTO EN EL SISTEMA DE POTENCIA. *DYNA*.
- América Fotovoltaica . (31 de 03 de 2015). *La guía solar* . Obtenido de <http://www.laguiasolar.com/energia-solar-en-colombia/>
- América Fotovoltaica . (20 de 02 de 2018). *La guía solar* . Obtenido de <http://www.laguiasolar.com/radiacion-solar-en-colombia/>
- Cuyo, U. N. (04 de noviembre de 2016). *Unidiversidad*. Obtenido de <http://www.unidiversidad.com.ar/acuiferos>
- DAB PUMPS. (2011). *MANUAL DEL INSTALADOR*. Mestrino: Dab water technology.
- Díaz, M. H. (2013). Diseño de un sistema híbrido. 48.
- Durespo S.A. (2010). Sistema híbrido de bombeo.
- Empresas Públicas de Medellín. (4 de abril de 2018). *epm*. Obtenido de https://www.epm.com.co/site/clientes_usuarios/clientes-y-usuarios/empresas/aguas/tips-para-el-uso-inteligente
- Energía Doble Cero. (2018). *Energía Doble Cero*. Obtenido de <http://energiadoblezero.com/energias-renovables/energia-eolica/componentes-de-un-aerogenerador>
- Energía Solar. (17 de 03 de 2016). *Energía solar*. Obtenido de <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/panel-fotovoltaico/ubicacion-paneles>
- Energías renovables. (25 de 11 de 2014). *Energías renovables*. Obtenido de <http://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/tipos-paneles-fotovoltaicos/>
- Energías sustentables. (10 de 03 de 2018). *Energías sustentables*. Obtenido de <http://www.energiasustentables.com.ar/energia%20solar/fundamentos%20iniciales.html>
- ERENOVABLE. (02 de 21 de 2018). *ERENOVABLE.COM*. Obtenido de <https://erenovable.com/como-funcionan-los-paneles-solares/>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fernández, F. (24 de 08 de 2015). *click renovables*. Obtenido de <http://clickrenovables.com/blog/como-calculiar-una-instalacion-solar-fotovoltaica-en-5-pasos/>

Figueredo, C. M. (3 de 05 de 2018). *Cuba Solar*. Obtenido de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia57/HTML/articulo03.htm>

Gevorkian, P. (2007). *Sustainable Energy Systems Engineering*. New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw-Hill .

Grand, L. I. (05 de 05 de 2018). *Thinglink*. Obtenido de <https://www.thinglink.com/scene/693548910760689666>

Grundfos. (05 de 06 de 2018). *grundfos*. Obtenido de <https://es.grundfos.com/Formacion-en-bombas/ecademy/all-topics/basic-principles-and-pump-types/about-pump-curves.html>

Gstriatum. (8 de enero de 2015). *Gstriatum*. Obtenido de <http://www.gstriatum.com/energiasolar/blog/2015/01/08/energia-eolica-tipos-de-turbinas-de-viento/>

Hidromaster. (2008). Obtenido de http://www.hidromaster.com.mx/Productos/Bombas/Bombas_Sumergibles.html#2

IDEAM; UPME. (2005). *Atlas de Radiación solar de Colombia* . Bogotá.

Ignacio Gomez IHM SAS. (2000). *Selección de bombas*. madrid-cundinamarca: IHM.

Iniewski, K. (2013). *Smart Grid Infrastructure & Networking*. McGraw-Hill.

Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2011).

JIMÉNEZ, C. Á. (22 de marzo de 2015). ¿Cómo es el avance en la cobertura de acueducto en Colombia? *El Tiempo*.

Martinez, M. V., & Lopez, A. I. (1984). *Pozos y acuíferos* . Madrid: Talleres Graficos Ibergesa.

Mishnaevsky, L., Branner, K., Nørgaard, H., Beauson, J., McGugan, M., & Sørensen, B. (noviembre de 2017). Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M., & Sørensen, B. F. (2017). MateriaMaterials*.

Mora, L. (20 de 05 de 2013). *Hoy es noticia en la Guajira*. Obtenido de <http://www.hoyesnoticiaenlaguajira.com/2013/05/cerejon-noticias-lanzamiento-del-plan.html>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Olmedo, F. (14 de 12 de 2009). *Biodisol*. Obtenido de <http://www.biodisol.com/destacado/que-es-un-colector-solar-o-captador-solar-tipos-de-colectores-solares-energia-solar-termica/>

Ordoñez, J. J. (2012). Cartilla tecnica aguas subterranas. *foro peruano para el agua*.

Otálvaro, M. V. (1999). *HIDRÁULICA DE AGUAS*. FACUTAD DE MINAS UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.

PAVCO. (2014). *MANUAL TECNICO TUBOSISTEMAS PRESION PVC*. BOGOTA: SADE.

Piedrahita, C. A., & Posada, C. C. (2005). *Atlas de radiación solar de Colombia*. Bogotá. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21129/.../2a207e33-fe43-4aa3-930d-70ba60b10d57>

PORTILLO, G. (30 de 05 de 2018). *RENOVABLES VERDES*. Obtenido de <https://www.renovablesverdes.com/aerogeneradores-verticales/>

ruralsupplies.eu. (18 de 06 de 2018). *rural supplies*. Obtenido de <https://ruralsupplies.eu/4-informacion-al-usuario/abastecimiento-autonomo/11-construccion-y-mantenimiento-del-pozo/>

Sáenz, J. (07 de Agosto de 2017). En penumbras: 2,5 millones de colombianos no tienen energía eléctrica. *El Espectador*, pág. 2.

Scada solutions. (06 de 03 de 2018). Obtenido de <http://www.scadasolutions.com/wind-tutorial.shtml>

Serrano, R. (02 de 03 de 2018). *Tritec interventor*. Obtenido de <http://www.tritec-intervento.cl/productostritec/tipos-de-paneles-fotovoltaicos/>

Simax. (2018). product features.

Southwest Windpower. (2008). whisper 100/200.

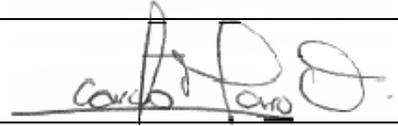
Suministros y montajes eólicos S.L. (06 de 03 de 2018). Obtenido de <http://www.e-vawt.es/index.php?seccion=por-que-aerogeneradores>

Valdiya, K. (2013). *GEOLOGÍA AMBIENTAL*. McGraw Hill Education.

volt Delta. (06 de 03 de 2018). Obtenido de <http://deltavolt.pe/energia-renovable/bombeo-solar>

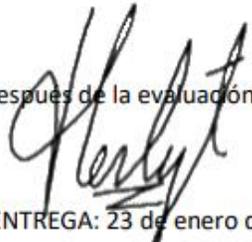
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES



 Felipe Alvarez Hincapié

FIRMA ASESOR (Versión corregida después de la evaluación inicial)


 FECHA ENTREGA: 23 de enero de 2019

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____