



ANÁLISIS COMPARATIVO TÉCNICO ECONÓMICO ENTRE SISTEMAS DE BOMBEO ACCIONADOS POR FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES Y CONVENCIONALES EN PROYECTOS DE PEQUEÑA IRRIGACIÓN.

CASO: VEREDA BETANIA, MUNICIPIO DE GINEBRA, DEPARTAMENTO DEL VALLE DEL CAUCA

FABIÁN ALEXANDER VELÁSQUEZ POLINDAR

CÓDIGO: 11127192

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE,
EIDENAR**



ANÁLISIS COMPARATIVO TÉCNICO ECONÓMICO ENTRE SISTEMAS DE BOMBEO ACCIONADOS POR FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES Y CONVENCIONALES EN PROYECTOS DE PEQUEÑA IRRIGACIÓN.

CASO: VEREDA BETANIA, MUNICIPIO DE GINEBRA, DEPARTAMENTO DEL VALLE DEL CAUCA

FABIÁN ALEXANDER VELÁSQUEZ POLINDAR

CÓDIGO: 11127192

DIRECTOR

NORBERTO URRUTIA COBO. PhD.

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE,
EIDENAR**

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
2	ANTECEDENTES.....	3
3	JUSTIFICACIÓN	6
4	OBJETIVOS	8
4.1	Objetivo General.....	8
4.2	Objetivos Específicos	8
5	MARCO TEÓRICO.....	9
5.1	Bomba hidráulica.....	9
5.1.1	Tipos de bombas.....	9
5.1.2	Elementos de una bomba centrífuga.....	9
5.1.3	Cavitación.....	10
5.1.4	Estación de bombeo.....	10
5.1.5	Arreglo en sistemas de bombeo.....	11
5.1.6	Tipos de sistemas de bombeo	11
5.1.7	Curva del sistema	13
5.1.8	Pérdidas de carga.....	13
5.2	Energías renovables	13
5.3	Energía hidráulica	14
5.3.1	Rueda hidráulica.....	14
5.3.1.1	Tipos de rueda hidráulica	15
5.3.1.2	Rueda hidráulica ROCHFER	16
5.4	Energía solar	17
5.4.1	Radiación solar	18
5.4.2	Sistema fotovoltaico	18
5.4.2.1	Panel solar	19
5.4.2.2	Controlador de carga	20
5.4.2.3	Batería	20
5.4.2.4	Inversor.....	21
5.4.3	Instalación en sistemas solares	21
5.4.3.1	Sistemas solares autónomos	21
5.4.3.2	Sistemas solares interconectados	21
5.4.3.3	Sistemas híbridos.....	21

5.4.4	Posición de los paneles	21
5.4.4.1	Orientación	22
5.4.4.2	Inclinación	22
5.5	Energías no renovables	23
5.5.1	Combustibles fósiles	23
5.5.2	Energía nuclear	23
6	METODOLOGÍA	24
6.1	Localización y descripción	24
6.2	Recopilación de información secundaria	24
6.2.1	Información topográfica	25
6.2.2	Información del sistema de riego por goteo	25
6.3	Cálculo del caudal de oferta	27
6.4	Cálculo de la radiación solar	28
6.4.1.1	Estimación de datos faltantes	29
6.4.1.2	Cálculo de probabilidad de excedencia	29
6.5	Diseño de bocatoma con rejilla de fondo	29
6.5.1	Azud	30
6.5.2	Rejilla y canal de aducción	31
6.5.3	Cámara de recolección	32
6.5.4	Caudal de excesos	32
6.5.5	Tubería de excesos	33
6.5.6	Conducción bocatoma-desarenador	33
6.5.7	Desarenador	34
6.5.8	Conducción del desarenador al pozo de succión	36
6.6	Diseño del sistema de bombeo convencional	36
6.6.1	Parámetros de diseño	36
6.6.2	Selección del equipo de bombeo	38
6.6.3	Punto real de operación del sistema (PRO)	38
6.6.4	Cavitación	38
6.6.5	Sumergencia	38
6.6.6	Pozo de succión	38
6.6.7	Caseta de bombeo	39

6.7	Diseño del sistema de bombeo fotovoltaico	39
6.7.1	Parámetros de diseño	39
6.7.2	Dimensionado del sistema fotovoltaico.....	40
6.7.2.1	Paneles fotovoltaicos.....	40
6.7.2.2	Batería	41
6.7.2.3	Controlador de carga	41
6.7.2.4	Inversor.....	41
6.7.2.5	Cableado.....	42
6.7.2.6	Soporte para paneles.....	42
6.8	Diseño del sistema de bombeo mediante Bomba ROCHFER	42
6.8.1	Parámetros de diseño	42
6.8.2	Selección bomba ROCHFER	43
6.8.3	Punto real de operación del sistema (PRO).....	43
6.8.4	Estructura hidráulica de captación.....	44
6.8.5	Conducción bocatoma-rueda ROCHFER.....	44
6.8.6	Base de la bomba.....	44
6.8.7	Pozo de succión	44
6.8.8	Canal de retorno.....	44
6.9	Evaluación técnica-económica.....	44
6.9.1	Estimación de ingresos	44
6.9.2	Evaluación de la tecnología.....	45
6.9.3	Estimación de inversión y costos	45
6.9.4	Financiamiento de la inversión.....	45
6.9.5	Análisis financiero.....	45
6.9.5.1	Flujo de caja libre.....	45
6.9.5.2	Rentabilidad financiera	46
7	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	47
7.1	Información secundaria.....	47
7.1.1	Información topográfica	47
7.1.2	Información del sistema de riego por goteo	47
7.2	Caudal de oferta	48
7.3	Radiación solar	49

7.4	Escenarios de operación.....	49
7.5	Bocatoma con rejilla de fondo	51
7.5.1	Azud	51
7.5.2	Rejilla y canal de aducción.....	51
7.5.3	Cámara de recolección.....	53
7.5.4	Caudal de excesos.....	53
7.5.5	Tubería de excesos.....	54
7.5.6	Conducción bocatoma-desarenador.....	54
7.5.7	Desarenador	55
7.5.8	Conducción del desarenador-pozo de succión.....	58
7.6	Bombeo convencional.....	59
7.6.1	Parámetros de diseño	59
7.6.2	Selección del equipo de bombeo	61
7.6.3	Punto real de operación del sistema (PRO).....	62
7.6.4	Cavitación.....	63
7.6.5	Sumergencia	63
7.6.6	Pozo de succión	64
7.6.7	Caseta de bombeo	64
7.7	Bombeo solar fotovoltaico.....	65
7.7.1	Parámetros y datos de diseño.....	65
7.7.2	Dimensionado del sistema fotovoltaico con baterías	67
7.7.2.1	Paneles fotovoltaicos.....	67
7.7.2.2	Batería	69
7.7.2.3	Controlador de carga	69
7.7.2.4	Inversor.....	70
7.7.2.5	Cableado.....	70
7.7.2.6	Soporte para paneles.....	71
7.7.3	Dimensionado del sistema fotovoltaico sin baterías.....	71
7.7.3.1	Paneles fotovoltaicos.....	71
7.7.3.2	Inversor.....	72
7.7.3.3	Cableado.....	72
7.8	Bombeo hidráulico Rueda ROCHFER	72

7.8.1	Parámetros de diseño	72
7.8.2	Selección bomba ROCHFER	75
7.8.3	Punto real de operación del sistema (PRO)	76
7.8.4	Bocatoma con rejilla de fondo.....	77
7.8.5	Conducción bocatoma-rueda ROCHFER.....	78
7.8.6	Base de la bomba.....	79
7.8.7	Pozo de succión	79
7.8.8	Canal de retorno.....	79
7.9	Evaluación técnica-económica.....	80
7.9.1	Estimación de ingresos	80
7.9.2	Evaluación de la tecnología.....	80
7.9.3	Estimación de inversión y costos de operación y mantenimiento	82
7.9.4	Financiamiento de la inversión.....	83
7.9.5	Análisis financiero.....	83
7.9.5.1	Flujo de caja libre.....	83
7.9.5.2	Rentabilidad financiera	83
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
8.1	CONCLUSIONES	87
8.2	RECOMENDACIONES.....	87
	BIBLIOGRAFÍA.....	89
	ANEXO 1. REGISTROS MULTIANUALES DE BRILLO SOLAR (EST. TENERIFE).....	92
	ANEXO 2. RELACIONES HIDRÁULICAS PARA CONDUCTOS CIRCULARES	93
	ANEXO 3. CALIBRE DEL ALAMBRE SEGÚN LA AWG	94
	ANEXO 4. REGISTRO DEL AFORO REALIZADO EN EL RÍO GUABAS.....	95
	ANEXO 5. FICHA TÉCNICA DEL PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO	96
	ANEXO 6. FICHA TÉCNICA DEL BATERÍA VRLA EN GEL.....	97
	ANEXO 7. FICHA TÉCNICA DEL CONTROLADOR MPPT	98
	ANEXO 8. FICHA TÉCNICA DEL INVERSOR SOLAR.....	99
	ANEXO 9. ANÁLISIS EN EL SISTEMA DE BOMBEO HIDRÁULICO ROCHFER.....	100
	ANEXO 10. PLANOS Y ESQUEMAS	101
	ANEXO 11. PRESUPUESTO	107
	ANEXO 12. FLUJO DE CAJA.....	110

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Condiciones climáticas en el municipio de Ginebra</i>	25
Tabla 2. <i>Evapotranspiración de referencia mensual y diaria del cultivo de zapallo</i>	25
Tabla 3. <i>Información general del cultivo de zapallo</i>	26
Tabla 4. <i>Características de la cinta de goteo implementada en Betania</i>	26
Tabla 5. <i>Número de laterales ubicadas en el río</i>	28
Tabla 6. <i>Caudal y volumen de riego del primer y segundo diseño.</i>	47
Tabla 7. <i>Verticales en la sección transversal en el punto de captación del río Guabas</i>	48
Tabla 8. <i>Caudal por sección transversal del río Guabas</i>	48
Tabla 9. <i>Datos de brillo solar diario e irradiación en la vereda Betania</i>	49
Tabla 10. <i>Caudales de bombeo asociados a días de autonomía del sistema de bombeo</i>	49
Tabla 11. <i>Cálculo del diámetro en las tuberías de succión e impulsión.</i>	50
Tabla 12. <i>Parámetros de diseño en tubería PVC.</i>	50
Tabla 13. <i>Condiciones de diseño en el azud</i>	51
Tabla 14. <i>Resultados en el diseño de la rejilla y el canal de aducción.</i>	51
Tabla 15. <i>Cálculo del momento flector y espesor del barrote</i>	52
Tabla 16. <i>Condiciones en el canal de aducción.</i>	52
Tabla 17. <i>Condiciones en la cámara de recolección</i>	53
Tabla 18. <i>Condiciones para el caudal de excesos</i>	53
Tabla 19. <i>Parámetros en la tubería de conducción (bocatoma hasta el desarenador).</i>	54
Tabla 20. <i>Condiciones en el desarenador.</i>	55
Tabla 21. <i>Condiciones en el vertedero de salida y cámara de aquietamiento.</i>	56
Tabla 22. <i>Condiciones entre el desarenador y el pozo de succión</i>	58
Tabla 23. <i>Parámetros en la tubería de succión</i>	59
Tabla 24. <i>Accesorios en la tubería de succión (longitud equivalente)</i>	59
Tabla 25. <i>Parámetros en la tubería de impulsión.</i>	60
Tabla 26. <i>Accesorios en la tubería de impulsión (longitud equivalente).</i>	60
Tabla 27. <i>Dimensionamiento del bombeo solar fotovoltaico con baterías.</i>	66
Tabla 28. <i>Dimensionamiento del bombeo solar fotovoltaico sin baterías.</i>	67
Tabla 29. <i>Datos del panel solar fotovoltaico.</i>	67
Tabla 30. <i>Resultados del dimensionamiento de los paneles solares fotovoltaicos.</i>	68
Tabla 31. <i>Tipo de cable según la AWG para cada componente</i>	70

Tabla 32. Resultados del dimensionamiento de los paneles solares fotovoltaicos.	72
Tabla 33. Cableado para sistema solar sin baterías.	72
Tabla 34. Parámetros en el sistema de bombeo ROCHFER.	73
Tabla 35. Parámetros en la tubería de succión.	73
Tabla 36. Accesorios en la tubería de succión (longitud equivalente).	74
Tabla 37. Pérdidas por accesorios y tubería en la succión.	74
Tabla 38. Parámetros en la tubería de impulsión.	74
Tabla 39. Accesorios en la tubería de impulsión (longitud equivalente).	74
Tabla 40. Pérdidas por accesorios y tubería en la impulsión.	75
Tabla 41. Parámetros y resultados en el diseño de la captación ROCHFER.	77
Tabla 42. Resultados de diseño en la conducción bocatoma-rueda ROCHFER.	78
Tabla 43. Resultados del dimensionamiento del canal de retorno.	79
Tabla 44. Costos de producción por hectárea en el cultivo del zapallo	80
Tabla 45. Utilidad anual neta por la venta de zapallo	80
Tabla 46. Presupuesto global del bombeo eléctrico.	82
Tabla 47. Presupuesto global del bombeo solar fotovoltaico con baterías	82
Tabla 48. Presupuesto global del bombeo solar fotovoltaico sin baterías	82
Tabla 49. Presupuesto global del bombeo hidráulico ROCHFER.	83
Tabla 50. Costo anual de operación y mantenimiento de los sistemas de bombeo.	83
Tabla 51. Rentabilidad financiera para cada sistema de bombeo	84
Tabla 52. Análisis de sensibilidad para un área de 0.8 ha	84
Tabla 53. Análisis de sensibilidad para un área de 1.6 ha	85

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Elementos constitutivos de una bomba centrífuga.	9
Ilustración 2. Instalación típica de una bomba centrífuga.	11
Ilustración 3. Arreglo en sistemas de bombeo.	11
Ilustración 4. Sistema de bombeo en succión positiva.	12
Ilustración 5. Sistema de bombeo en succión negativa.	12
Ilustración 6. Punto real de operación en una bomba centrífuga.	13
Ilustración 7. Rueda Romana (izquierda), Rueda Griega (derecha).	14
Ilustración 8. Ruedas hidráulicas de empuje superior, empuje lateral y empuje inferior. ...	15
Ilustración 9. Rueda hidráulica ROCHFER.	16

<i>Ilustración 10.</i>	Bombeo con ruedas hidráulicas ROCHFER.....	17
<i>Ilustración 11.</i>	Bombeo con energía solar fotovoltaica.....	18
<i>Ilustración 12.</i>	Curva característica del módulo fotovoltaico.	19
<i>Ilustración 13.</i>	Orientación (α) y ángulo de inclinación (β) del panel solar.....	22
<i>Ilustración 14.</i>	Ubicación del predio Asociación Finca en Betania SRC 3115.....	24
<i>Ilustración 15.</i>	Molinete marca General Oceanics modelo 2030 estándar.....	27
<i>Ilustración 16.</i>	Método de la sección media en ríos.....	28
<i>Ilustración 17.</i>	Bocatoma con rejilla de fondo (planta).....	30
<i>Ilustración 18.</i>	Bocatoma con rejilla de fondo (corte longitudinal).	30
<i>Ilustración 19.</i>	Perfil de la rejilla y canal de aducción.....	31
<i>Ilustración 20.</i>	Corte de la cámara de recolección.....	32
<i>Ilustración 21.</i>	Desarenador vista en planta y perfil longitudinal.....	34
<i>Ilustración 22.</i>	Caseta de bombeo convencional.....	36
<i>Ilustración 23.</i>	Bombeo hidráulico mediante bomba ROCHFER.....	42
<i>Ilustración 24.</i>	Distribución de los módulos de riego.....	47
<i>Ilustración 25.</i>	Sección transversal en el punto de la captación del río Guabas.....	48
<i>Ilustración 26.</i>	Curvas características de la bomba centrífuga multietapas.....	61
<i>Ilustración 27.</i>	Punto real de operación del sistema de bombeo eléctrico.....	62
<i>Ilustración 28.</i>	Distancia de sumergencia en el pozo de succión.....	63
<i>Ilustración 29.</i>	Dimensionamiento de la base de la bomba centrífuga.....	64
<i>Ilustración 30.</i>	Sistema de armazón para paneles solares.....	71
<i>Ilustración 31.</i>	Curva característica de la bomba ROCHFER MSG-70D.....	76
<i>Ilustración 32.</i>	Punto real de operación del sistema de bombeo ROCHFER.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS

CA	Corriente Alterna
CAP	Costa Americana del Pacífico de Chile
CC	Corriente Continúa
CEM	Condiciones Estándar de Medida.
CEPIS	Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
ENA	Encuesta Nacional Agropecuaria
EPSA	Empresa de Energía del Pacífico
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FARC-EP	Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia-Ejército del Pueblo
FINAGRO	Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario
GEI	Gas de Efecto Invernadero
ICEE	Índice de Cobertura de Energía Eléctrica
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia
INDAP	Instituto de Desarrollo Agropecuario de Chile
PIB	Producto Interno Bruto
PRO	Punto Real de Operación
SANAA	Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados de Costa Rica
SGR	Sistema General de Regalías
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética

RECONOCIMIENTOS

- Le doy gracias a Dios por todas las bendiciones concebidas y por el apoyo espiritual que me brindo durante este proceso.
- A mis padres Olga Marina Polindar y Alexander Velasquez por su apoyo incondicional brindado durante este proceso arduo y largo del pregrado.
- A mi hermana Paola Andrea Velasquez Polindar por su acompañamiento y motivación.
- A mis abuelos Lázaro Velasquez, Marina Mosquera, Rosalba Galíndez y Fabio Mosquera por contribuir con su motivación y fuerza espiritual.
- A mi director de trabajo de grado Norberto Urrutia Cobo por su acompañamiento, observación y dedicación durante todo el proceso del trabajo de grado.
- A mis compañeros Oscar Orozco, Javier Arias, Selene Ladino, Juan Felipe Hernández, Frank Hurtado, por su colaboración en la recopilación de información.
- A los profesores Andrés Echeverry Ingeniero Agrícola, Julia Osorio Ingeniera Civil, José Luis García Ingeniero Civil, Jenifer Ramos Ingeniera industrial por sus explicaciones en riegos, obras civiles y análisis financiero respectivamente.
- A las personas y las empresas que contribuyeron en las cotizaciones realizadas de los equipos, de los materiales y los soportes técnicos.

RESUMEN

El trabajo investigativo consistió en determinar cuál alternativa de bombeo resultaba técnica y económicamente viable para el proyecto que se llevó a cabo en el predio Asociación Finca, teniendo como fuente de ingreso el cultivo del zapallo. La finca está ubicada en la vereda Betania, corregimiento de Juntas, municipio de Ginebra, departamento del Valle del Cauca, donde la principal actividad económica es la agricultura, la cual se ve afectada por la poca disponibilidad de agua para irrigación en época de sequía a causa del fenómeno de El Niño, lo cual afecta notoriamente al cultivo, reduciendo su rendimiento.

Con el fin de encontrar una solución a esta problemática, se plantearon, diseñaron y analizaron tres alternativas de bombeo; el primero a base de energía eléctrica, el segundo a base de energía solar fotovoltaica con y sin baterías, y el tercero mediante ruedas ROCHFER.

Las tres alternativas de bombeo planteadas técnicamente dan solución a la problemática que se presenta en el predio. Por último, se determinó, mediante el análisis financiero utilizando los indicadores de rentabilidad (VPN y TIR) y un análisis de sensibilidad, que el bombeo apropiado para la finca es el bombeo hidráulico con ruedas ROCHFER debido a que el VPN fue mayor a cero y superior al VPN de las otras alternativas y, además, la TIR resultó positiva.

Palabras Claves: Cultivo de zapallo, energía eléctrica, energía solar fotovoltaica, rueda hidráulica ROCHFER, valor presente neto, tasa interna de retorno, análisis de sensibilidad.

1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado es una investigación que tiene como objetivo comparar técnica y económicamente tres sistemas de bombeo para un proyecto de pequeña irrigación en zona de ladera localizada en la vereda de Betania perteneciente al municipio de Ginebra, Valle del Cauca. Para ello se diseñó un sistema de bombeo accionado por energía eléctrica, energía solar fotovoltaica y energía hidráulica utilizando rueda ROCHFER.

En las zonas de ladera se presentan problemas por la poca disponibilidad de agua para irrigación afectando el rendimiento del cultivo. En muchos casos la captación del agua por gravedad se hace difícil debido a las condiciones topográficas del lugar, por ende se hace necesario la utilización de una bomba que impulse el agua hasta un tanque de almacenamiento; esto implica un costo por el consumo de energía eléctrica o combustible para su accionar; y es por ello que se desea incorporar sistemas de bombeo accionados por fuentes de energía renovables para que el costo de operación sea mínimo.

La investigación del tema propuesto se realizó con el fin de mejorar la disponibilidad hídrica en el predio Asociación Finca, teniendo en cuenta factores técnicos y económicos. El propósito fue determinar el tipo de bombeo accionado por fuentes de energía renovables apropiado para la finca en Betania, y que la metodología planteada sea de gran utilidad para el desarrollo de proyectos agrícolas con este tipo de energías limpias.

Durante la toma de datos en campo no hubo mayor inconveniente, pero en la recopilación de información de caudales del río Guabas y de radiación solar sí se tuvo problemas por lo que no hay información de parte de las entidades encargadas; por ello se optó por utilizar datos de estaciones cercanas a la estación de bombeo.

En el capítulo 1 se presenta la introducción de lo que se desea con este proyecto, la problemática que se presenta en la zona y la importancia de realizar esta investigación.

En el capítulo 2 se presentan los antecedentes, en donde se mencionan algunos proyectos que se han realizado a nivel mundial aplicando energía solar fotovoltaica y energía hidráulica utilizando rueda ROCHFER.

En el capítulo 3 se plantea la justificación del proyecto y el por qué la elección de las energías solar e hidráulica como fuentes principales de generación de energía limpia aplicadas a sistemas de bombeo para uso agrícola.

En el capítulo 4 se plantean los objetivos del trabajo de grado y en el capítulo 5 se presenta el marco teórico, donde se realizó un estudio de las bombas centrífugas y las energías solar e hidráulica como fuentes de energía renovables y sus aplicaciones al campo agrícola.

En el capítulo 6 se plantea la metodología, en la cual se presenta una breve descripción y localización del proyecto, recopilación de información donde se menciona el sistema de riego implementado, información topográfica, de radiación solar, el tipo de método para aforar el río Guabas, el dimensionamiento de los sistemas de bombeo convencional, solar

fotovoltaico e hidráulico con rueda ROCHFER y el análisis financiero de los sistemas de bombeo.

En el capítulo 7 se presentan los resultados y análisis de los tres sistemas de bombeo planteados, además del diseño de una estructura hidráulica de captación. Por último, se realizó la evaluación técnica-económica de los sistemas de bombeo para determinar la mejor alternativa para el caso específico en Betania.

En el capítulo 8 se presentan las conclusiones y recomendaciones del estudio. Por último, se presenta la bibliografía utilizada y los anexos, en los cuales se encuentran tablas, fichas técnicas de los equipos solares, planos de diseño de los sistemas de bombeo y, además, los cálculos de la rentabilidad de los sistemas de bombeo.

2 ANTECEDENTES

Como consecuencia de la guerra Árabe-Israelí en 1973, denominada la guerra del Yom Kipur, posteriormente la crisis mundial energética en 1979 y, años más tarde, la guerra del Golfo Pérsico, el petróleo sufrió una gran inestabilidad en los precios, lo cual afectó tanto a productores como a consumidores. Ante los constantes cambios del precio del petróleo, Khader (2003) daba como solución a los países europeos fomentar y desarrollar las energías alternativas para evitar la dependencia de los combustibles fósiles.

Colombia no se vio ajena a una crisis energética; según Naranjo (2012), el fenómeno de El Niño azotó a todo el país en el año 1992, ocasionando altas temperaturas y sequías prolongadas. Los embalses generadores de energía eléctrica alcanzaron sus niveles más bajos, por lo cual, se tomaron medidas como la restricción del uso de energía en algunas regiones y adelantar una hora el reloj del país.

Debido a las crisis del petróleo y de energía eléctrica, varios países optaron por utilizar energías independientes o renovables. En países como Alemania, Italia, España, Francia, Bélgica, Reino Unido, Estados Unidos, China, Japón, Chile y México, entre otros, han incursionado en la energía solar, desarrollando varios estudios con el objeto de aumentar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos. A nivel mundial Estados Unidos tiene la planta solar más grande y en Sudamérica Chile es potencia generando 100 MW con paneles solares.

La planta solar más grande del mundo, Topaz Solar Farm está ubicada en San Luis Obispo, California, Estados Unidos. Cuenta con 9 millones de paneles solares suministrando 550 MW para abastecer a 160.000 hogares. La planta duro dos años en construcción y se desea que reduzca 377.000 toneladas las emisiones de CO₂ y así contribuir con el medio ambiente (Diario Ecología, 2014).

La planta fotovoltaica más grande en Latinoamérica “Amanecer Solar CAP” se encuentra ubicada en Chile en la comuna de Copiapó, desierto de Atacama; en ella se instalaron 310.000 paneles solares en un área de 250 ha, tiene una capacidad instalada de 100 MW, cantidad suficiente para abastecer a 125.000 hogares de energía eléctrica. Se estima que el sistema produzca 270 GW/h anuales de energía limpia (CAP, 2014).

En Chile, por medio del Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), se desarrolló un proyecto en la localidad de Caimanes, ubicada en la comuna Los Vilos, región de Coquimbo, que beneficia a 25 agricultores; este consiste en un sistema de riego abastecido por un pozo profundo, donde se instaló una bomba de 20 HP accionada por energía solar fotovoltaica, generada a partir de 90 paneles que producen 15 kW/h, de los cuales 32 tienen seguidor solar. El agua se eleva a 100 metros de altura desde un pozo hasta un tanque, aplicándose gravitacionalmente por goteo a 12 ha de nogales. La inversión del proyecto fue de \$ 53 millones de pesos chilenos (Redagícola, 2013).

López-Luque et al. (2015) implementaron un modelo con la finalidad de evaluar el rendimiento y fiabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos para riego en cultivo de olivares en las condiciones del clima mediterráneo. El modelo estaba conformado por un

generador fotovoltaico, una bomba centrífuga con velocidad de giro variable y un modelo de producción de olivar en función de la disponibilidad de agua, en el cual se demostró una reducción en los costos de operación y consumo de agua. Para el autor estos sistemas de bombeo con energía solar autónomos utilizados en riego son una alternativa técnica y económicamente viables para el cultivo de olivares.

Campana et al. (2015) realizaron un análisis comparativo técnico-económico de un sistema de riego accionado por energías solar y eólica para la conservación de pastizales y tierras de cultivo en China. Para el sistema fotovoltaico utilizaron paneles solares, convertidor de frecuencia variable, bomba centrífuga multietapas y sistema de riego por goteo con eficiencia del 90%; no se tuvieron en cuenta tanques de almacenamiento ni baterías para disminuir costos. Para concluir, la solución más rentable para el riego depende de las condiciones climáticas del lugar, aunque el sistema solar presentó un mejor rendimiento que el sistema eólico en el bombeo de agua para irrigación y ambas tecnologías son rentables, pero con alta inversión inicial.

Chandel et al. (2015) investigaron la aplicación de energía solar a sistemas de bombeo para uso doméstico y riego, encontrando que es una energía fiable y económicamente viable para reemplazar sistemas de bombeo accionados por energías eléctrica y diesel en cultivos agrícolas. Recomendaron utilizar bombas de desplazamiento positivo, bombas de cavidad progresiva debido a las altas eficiencias hidráulicas hasta del 70%, en comparación con las bombas centrífugas con eficiencias hidráulicas del 30%; además de utilizar seguimiento solar en los paneles para aumentar la eficiencia del sistema hasta en un 20%.

En Colombia, en el municipio de Yumbo, Valle del Cauca, la Empresa de Energía del Pacífico (EPSA) instaló el laboratorio más grande de energía solar fotovoltaica. Zuluaga (2014) manifestó que este proyecto se realizó para disminuir las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), desarrollar una línea investigativa en la implementación de energías renovables y ser una planta piloto a nivel nacional, así como “desarrollar diferentes proyectos y estrategias para mejorar la calidad de vida de los vallecaucanos, la productividad de la región y hacer grandes aportes al medio ambiente”. El sistema fotovoltaico consta de 294 paneles solares utilizando tres tipos de silicio monocristalino, policristalino y amorfo, los cuales producen alrededor de 6.227 kWh/mes, cantidad suficiente para suministrar a 43 casas. En el proyecto se invirtieron \$1.248 millones, el sistema no acumula energía y es interconectado al edificio, suministrando un 5 por ciento de la demanda a la empresa.

En el municipio de Aguachica, ubicado al sur del departamento del Cesar (Colombia), la empresa Hybrytec (2011) entregó un sistema de bombeo a base de energía solar para abastecer una finca lechera. En la extracción del agua del pozo profundo se utilizó una bomba sumergible PS600, la cual supera los 18 metros del nivel dinámico del pozo y los 11 metros de diferencia entre el tanque y nivel del terreno. El sistema solar se encuentra a 20 metros del pozo, generando 520 W pico de potencia, y la capacidad de bombeo son 15 m³/día para una cabeza dinámica de 29 metros.

Otra experiencia pero con energía hidráulica la realizó Godoy (2001), quien desarrolló por medio del SANAA (Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados de Costa Rica) la utilización de ruedas hidráulicas ROCHFER en dos proyectos del sector rural en los municipios de El Negrito y de Yoro, Departamento de Yoro, Honduras; donde se carecía del recurso hídrico para abastecer a una comunidad de alrededor 750 personas. En el municipio de El Negrito se optó por extraer agua de un nacimiento cercano, el cual se encontraba a 5 metros bajo el nivel del terreno de la comunidad y en el municipio de Yoro por perforar un pozo.

Debido a la topografía de ambos lugares fue necesario instalar un sistema de bombeo, para el cual se analizó la propuesta de llevar el agua por gravedad pero el costo era de 723,000.00 lempiras, un valor muy alto para la comunidad; entonces surgieron alternativas de fuentes de energías entre ellas la eléctrica, los combustibles fósiles, el ariete hidráulico y la eólica; pero algunos presentaban altos costos de operación y bajas eficiencias y otras técnicamente no eran factibles debido al clima del sitio. Por último, se decidió implementar la bomba del tipo rueda hidráulica debido a que los costos de construcción se reducían en un 50% respecto al sistema por gravedad.

En el caso de la Hacienda Vieja en el municipio de Yoro se instalaron bombas MS-4, C-12 con rueda de 1.65 x 0.36 m, con un caudal de accionamiento de 25 lps, el caudal bombeado fue de 31,300 l/día con carga de 61.63 m. El volumen diario deseado era de 83,009 l/día, por ende, se utilizaron tres bombas; el proyecto dio los resultados esperados abasteciendo a 75 viviendas, durante las 24 horas del día y los costos operativos fueron mínimos.

3 JUSTIFICACIÓN

Los agricultores, como fuente de energía para el accionar de su maquinaria agrícola y sistemas de bombeo, utilizan los combustibles fósiles. Estos tienen un impacto destructivo hacia el medio ambiente, como es la liberación de CO₂, lo cual incentiva el calentamiento global, además del alto y constante aumento de los precios. Por ello se hace insostenible para un agricultor un sistema de bombeo accionado por este tipo de energía, además de la causante contaminación que generan los combustibles fósiles al medio ambiente; debido a esto surge la necesidad de buscar otras energías alternativas que permitan reducir los impactos ambientales causados, evitar una crisis energética, costos de operación y mejorar el bienestar de las familias agricultoras; por tales motivos se recomienda usar energías renovables, tales como las energías hidráulica y solar, que son catalogadas como energías limpias debido a que presentan grandes beneficios al medio ambiente.

La energía solar es una de las mejores energías en el mundo debido a que se obtiene de forma gratuita, no produce emisiones de gases y se puede incorporar en cualquier parte donde no exista red eléctrica. En Colombia, en la mayoría de los casos, el medio rural no tiene acceso a energía eléctrica; según el Índice de Cobertura de Energía Eléctrica (ICEE) en Colombia para el año 2012 el único departamento con el 100% de cobertura eléctrica era San Andrés y Providencia (UPME, 2014), los demás no alcanzaban la totalidad de la cobertura. Aunque ya se están realizando proyectos para cubrir la totalidad del país no es viable económicamente para los agricultores que dependan de la energía eléctrica y los combustibles fósiles debido a sus altos precios; por tanto, las mejores soluciones para ellos son energías renovables, las cuales tienen un impacto social y ambiental positivo.

En Colombia el sector agropecuario aporta una décima parte del PIB y genera empleo a más de una quinta parte de la población nacional. Entre el 50% y el 90% de los productores de café, banano, plátano, cereales y cacao son pequeños agricultores, los cuales hacen parte de la gran mayoría de generadores de alimentos en el país; por ello la importancia de que el sector agrícola siga avanzando y se incorporen nuevas tecnologías que permitan optimizar el recurso hídrico, aumentar la productividad y mejorar la calidad de los alimentos, con el fin de ofrecerle a la comunidad un producto de calidad y a los agricultores aumento de su economía y generación de empleo (Lau et al., 2013).

Para llegar a ello los agricultores requieren ayuda del gobierno, la desigualdad, el conflicto armado y otra serie de circunstancias que se viven, hacen que el sector agrícola sea vulnerable y poco atractivo para los empresarios, quienes, al fin y al cabo, son los que terminan suministrando los recursos para realizar los proyectos en el país. Por eso Colombia requiere que llegue pronto al posconflicto, el cual será determinante en la agricultura y en el desarrollo económico y social del país.

Llegando a un acuerdo entre el gobierno y los grupos al margen de la ley habrá restitución de tierras y campesinos que fueron despojados de sus tierras podrán recuperarlas y utilizarlas para la agricultura y la ganadería; otro punto importante es que ya no habrá más redes eléctricas derribadas por las FARC-EP, que impiden a los campesinos, por falta de electricidad, realizar labores agrícolas como el riego; por ello, se deben instalar energías

autónomas para que estas labores agrícolas no se vean afectadas por esas situaciones y, además, para contribuir con el medio ambiente.

Debido a las condiciones topográficas en el lugar del proyecto se hace necesaria la implementación de un sistema de bombeo que solucione el problema de la poca reserva de agua para irrigación. La función de este sistema es transportar el fluido de una zona de captación, en este caso el río Guabas, hasta unos tanques de almacenamiento, donde se pueda utilizar fácilmente para riego, mejorando la disponibilidad de agua para esa labor y, además, mejorar los ingresos de las personas mediante una agricultura sostenible.

Este sistema de bombeo busca satisfacer las necesidades hídricas del cultivo del zapallo, el cual es utilizado como alimento y en la medicina pues debido a sus nutrientes tienen gran variedad de beneficios para la salud humana. La implementación de este sistema requiere la utilización de una energía que permita impulsar el agua de un lugar a otro; algunas energías pueden ser la eléctrica o los combustibles fósiles (derivados del petróleo), ambas alternativas son costosas, por lo que se hace necesario utilizar otro tipo de energías, como la hidráulica y la solar con el fin de disminuir los costos de operación y mantenimiento y contribuir a la conservación del medio ambiente.

Con este proyecto se pretende mejorar la irrigación en la vereda Betania, incrementando la disponibilidad de agua para el cultivo de zapallo, realizando un uso adecuado del agua mediante el riego por goteo. Con este trabajo se beneficiarán alrededor de 18 familias de la vereda; el área a cultivar es de una hectárea como modelo piloto, donde se cultivan alrededor de 2500 plantas de zapallo, cosechando 5 zapallos por planta, los cuales pueden pesar, en promedio, 3 kilogramos cada uno; su valor en el mercado es de 350 pesos por kilogramo. El proyecto también se realizó con la necesidad de ofrecer mejores condiciones a la población generando empleo en el sector agrícola, lo cual mejoraría la situación económica de los habitantes. Por último, se desea que este proyecto sea un modelo a seguir en otras fincas, tanto a nivel local como regional.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

- Comparar técnica y económicamente los sistemas de bombeo accionados por fuentes de energías renovables y convencionales en proyectos de pequeña irrigación en zonas de ladera.

4.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema de bombeo convencional para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo de zapallo.
- Diseñar un sistema de bombeo accionado por energía solar para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo de zapallo.
- Diseñar un sistema de bombeo accionado utilizando ruedas hidráulicas ROCHFER para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo de zapallo.
- Comparar técnica y económicamente los sistemas de bombeo convencional, energía solar y por ruedas hidráulicas ROCHFER.

5 MARCO TEÓRICO

5.1 Bomba hidráulica

Es una máquina hidráulica conformada principalmente por un rodete, el cual es el encargado de impulsar el fluido hacia un punto de descarga, al cual lo hace girar un motor aplicándole energía mecánica que posteriormente se transforma en energía hidráulica, generando un incremento de la velocidad y la presión del fluido (Corcho y Duque, 1997).

5.1.1 Tipos de bombas

Las bombas se clasifican dependiendo del material que la conformen, del fluido a bombear, la utilidad y la posición en el lugar, refiriéndose a las dinámicas y de desplazamiento; por otro lado, se encuentran las bombas rotodinámicas (centrífugas) que se clasifican así debido a que su movimiento siempre es rotativo transmitiéndose la energía mediante un rodete. Se clasifican, según la dirección de flujo de salida, en axiales, mixtas, radiales y periféricas. Además, se pueden clasificar por la posición del eje, la presión producida, el número de rodetes, la construcción de los rodetes, la construcción de la carcasa y la forma de los álabes del impulsor (Corcho y Duque, 1997)

5.1.2 Elementos de una bomba centrífuga

- Rodete: Es el encargado de impulsar el líquido por medio de álabes, que son los encargados de aplicar energía cinética y de presión al fluido. El movimiento rotatorio del eje del motor hace que gire el rodete.
 - Corona de álabes fijos: Capta el fluido del impulsor y convierte la energía cinética en energía de presión.
 - Caja espiral o voluta: Transforma la energía dinámica en energía de presión. Capta el fluido impulsado por el rodete y lo conduce a la tubería de descarga.
 - Tubo difusor: Se encarga de transformar la energía dinámica en energía de presión.
- Los elementos anteriores son los constitutivos de una bomba centrífuga, ver Ilustración 1.

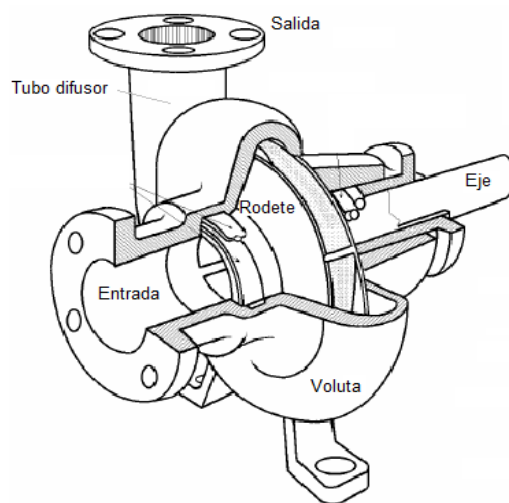


Ilustración 1. Elementos constitutivos de una bomba centrífuga.

Fuente. Salas y Urrestarazu (2008).

5.1.3 Cavitación

Es la formación de burbujas de vapor del fluido en la superficie confinante de la tubería, produciendo la implosión o colapso de las mismas; este fenómeno sucede por la baja presión del fluido en la tubería, ocasionando la vaporización del fluido. En las tuberías se presentan dos tipos de cavitación: vaporosa y gaseosa. La cavitación afecta al rodete de la bomba causando erosión en la corona, disminución del caudal, la presión y la eficiencia de la bomba, e incrementando la potencia ocasionando un mayor consumo de energía (Corcho y Duque, 1997).

Cavitación vaporosa: Se crean burbujas de vapor del fluido impulsado, debido a la vaporización del mismo.

Cavitación gaseosa: Se crean burbujas de gas, producidas por gases presentes en el fluido bombeado, por lo general aire.

NPSH (Net Positive Suction Head)

Este parámetro es el encargado de determinar si se presenta cavitación en un sistema de bombeo; se define como la diferencia entre la presión al momento del ingreso del fluido a la bomba y la presión de vapor del fluido bombeado, la cual es la necesaria para evitar la cavitación. Hay dos tipos de NPSH: el disponible y el requerido, que son utilizados en el diseño de sistemas de bombeo (CEPIS, 2005) .

NPSH disponible.

Depende del sistema de succión de la bomba, negativo o positivo, el cual debe ser mayor que el NPSH requerido por la bomba para evitar la cavitación; este parámetro tiene en cuenta la presión atmosférica, altura estática de succión, presión de vapor y las pérdidas en la línea de succión y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{NPSH}_d = H_a - H_v \pm H_{es} - h_{fs}$$

- Presión Atmosférica local (H_a) [m] - Presión de vapor del agua (H_v) [m]
- Altura estática de succión (H_{es}) [m] - Pérdidas en la tubería de succión (h_{fs}) [m]

NPSH requerido.

Es la condición de succión necesaria o la presión mínima que necesita una bomba para un óptimo funcionamiento; este parámetro viene dado por el fabricante de las bombas, el cual es determinado en pruebas experimentales (CEPIS, 2005). Corcho y Duque (1997) recomiendan que el NPSH disponible sea 1,4 veces mayor que el NPSH requerido por la bomba.

5.1.4 Estación de bombeo

Este sistema está conformado por un pozo de succión, una línea de succión, bombas, equipos de medición, accesorios y la línea de impulsión, ver Ilustración 2. Tiene como

función desplazar un fluido de un lugar a otro para ser utilizado en una determinada labor. Para que una estación de bombeo sea exitosa y eficiente se deben considerar algunos parámetros, tales como los recursos que estén a disposición y el tiempo de operación de los equipos.

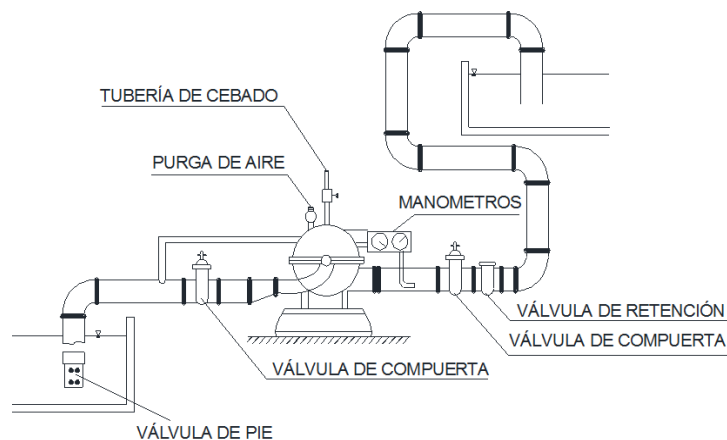


Ilustración 2. Instalación típica de una bomba centrífuga.

Fuente. Corcho y Duque (1997).

5.1.5 Arreglo en sistemas de bombeo

Se puede instalar dos o más bombas dependiendo del requerimiento hídrico o de presión que se requiera: para obtener mayor presión se instalan bombas en serie y para obtener mayor caudal se utilizan las bombas en paralelo, ver Ilustración 3 (Corcho y Duque, 1997).

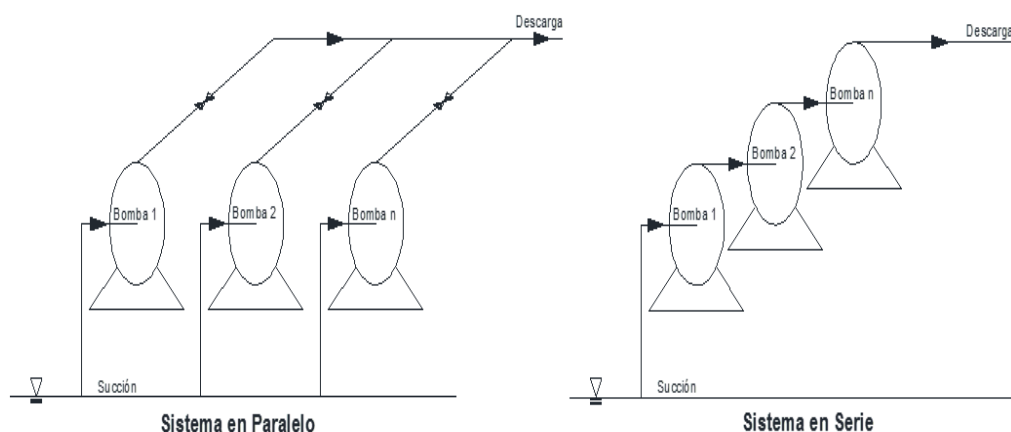


Ilustración 3. Arreglo en sistemas de bombeo.

Fuente. Propia (2015).

5.1.6 Tipos de sistemas de bombeo

Se encuentran dos tipos de sistemas de bombeo, dependiendo de donde se ubique el eje de la bomba respecto al nivel del agua en el pozo de succión: si el nivel del agua está por encima del eje se denomina succión positiva y si está por debajo del eje es succión negativa.

Sistema de bombeo en succión positiva.

La altura estática de succión (H_{es}) es la distancia vertical que hay entre el nivel del río o pozo de succión hasta el eje de la bomba; la altura estática de impulsión (H_{ei}) es la distancia vertical que hay entre el eje de la bomba y el punto de descarga, y la diferencia entre H_{ei} y H_{es} es la altura estática total (H_{ET}) que demanda el sistema, ver Ilustración 4.

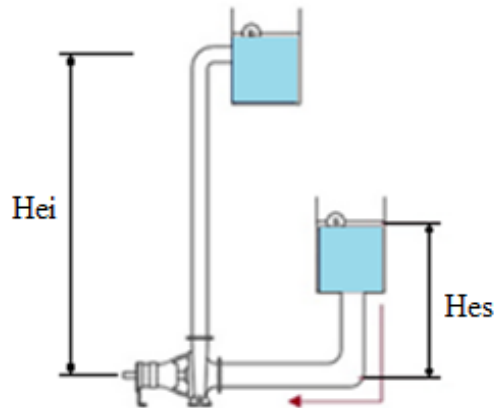


Ilustración 4. Sistema de bombeo en succión positiva.

Fuente. Hidrostral (2011).

Sistema de bombeo en succión negativa.

Los sistemas de succión negativa son los más implementados para riego y uso doméstico; la altura estática de succión (H_{es}) es la distancia vertical que hay entre el nivel del río hasta el eje de la bomba; la altura estática de impulsión (H_{ei}) es la distancia vertical que hay entre el eje de la bomba y el punto de descarga, las velocidades de succión (V_s) y descarga (V_d) son las velocidades de flujo a la entrada y la salida de la bomba, y la adición entre H_{ei} y H_{es} es la altura estática total (H_{ET}) que demanda el sistema, ver Ilustración 5.

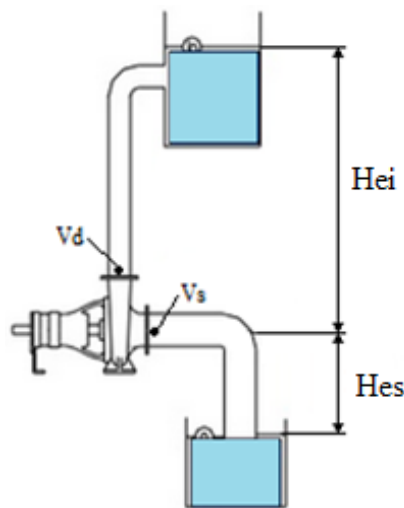


Ilustración 5. Sistema de bombeo en succión negativa.

Fuente. Hidrostral (2011).

5.1.7 Curva del sistema

Para la elaboración de la curva del sistema de tuberías se debe graficar la altura dinámica total en función del caudal; esta curva se realiza con el fin de conocer el punto real de operación del sistema, el cual resulta de interceptar la curva de la bomba con la curva del sistema, como se muestra en la Ilustración 6.

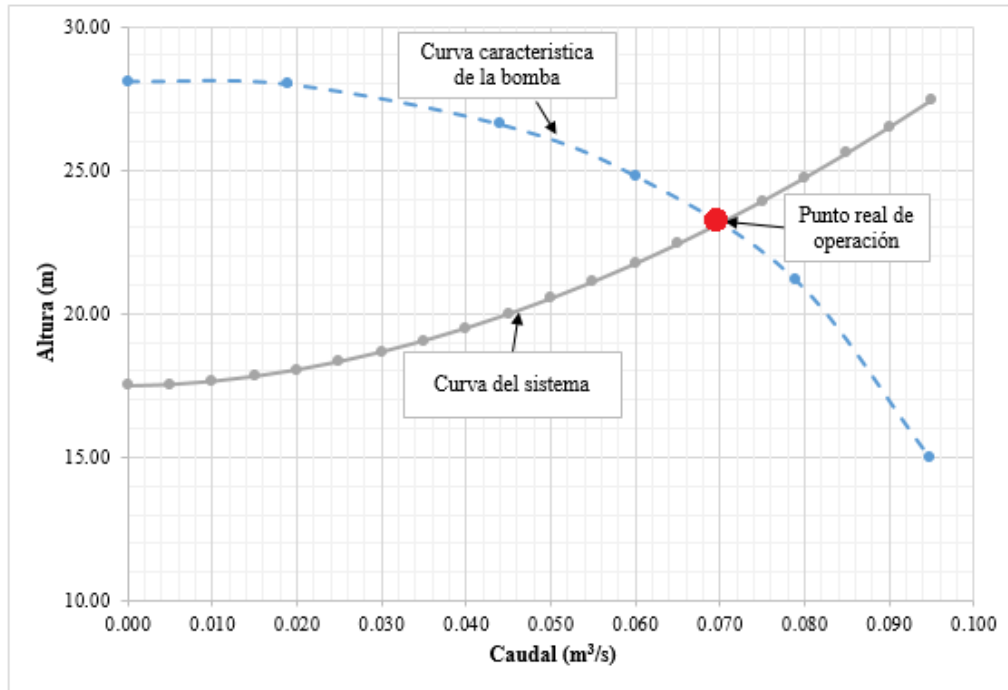


Ilustración 6. Punto real de operación en una bomba centrífuga.

Fuente. Propia (2016).

5.1.8 Pérdidas de carga

La ecuación de Hazen-Williams es una de las expresiones utilizadas para determinar las pérdidas de presión en una tubería; éstas se deben a la fricción del agua con la tubería. Las pérdidas que se presentan en una tubería dependen del tipo de material, el caudal transitado, la longitud y el diámetro de la tubería y se determinan mediante la siguiente ecuación:

$$h_f = \frac{10,675 * L * Q^{1,85}}{C^{1,85} * d^{4,87}}$$

Donde:

- Pérdidas en la tubería (h_f) [m] - Longitud de tubería (L) [m] - Caudal (Q) [m³/s]
- Coeficiente de Hazen-Williams (C) [adim] - Diámetro de tubería (d) [m]

5.2 Energías renovables

La energía es la capacidad que posee un cuerpo para desarrollar un trabajo específico o generar algún movimiento. La energía se puede obtener de la radiación solar, del viento, del

agua, de la madera y del carbón, entre otros. Las formas de energía se clasifican en renovables y no renovables. Las energías renovables son originadas por fuentes naturales, las cuales no se agotan y son reutilizables. Estas energías tienen un impacto positivo en el medio ambiente ya que la emisión de gases de efecto invernadero es casi nula en comparación con las energías convencionales que sí emiten este tipo de gases. Entre las fuentes de energías que se consideran renovables se encuentran las siguientes: eólica, solar, hidráulica, eléctrica, geotérmica, mareomotriz y biomasa (Roldán, 2008, 2013).

5.3 Energía hidráulica

La energía hidráulica aprovecha la energía potencial y cinética de los ríos y mares aplicada a turbinas o ruedas para generar electricidad. En la antigüedad también se implementaban para el accionar de molinos hidráulicos y en la época de la industrialización para hacer funcionar todo tipo de máquinas (Roldán, 2008, 2013).

El ciclo hidrológico es el principal factor para que la energía hidráulica sea una fuente de energía renovable; este proceso permanente se debe al sol y a la gravedad terrestre, el cual comienza desde la evaporación del agua de océanos, mares, ríos, lagos y la transpiración de las plantas; posteriormente el vapor de agua se condensa formando las nubes; éstas últimas ocasionan las precipitaciones; cuando llega a la superficie terrestre una parte de la lluvia es absorbida por las plantas, y la otra parte fluye por escorrentía e infiltración, esta última recargando las aguas subterráneas (Campos, 1998).

5.3.1 Rueda hidráulica

La rueda hidráulica es uno de los motores hidráulicos más antiguos; data de la época de los griegos, quienes utilizaron una rueda, conocida como noria, con el fin de impulsar agua para la agricultura y consumo humano; esta fue inventada por Filón de Bizancio en el siglo III a.C. Aunque la implementación de estas ruedas tienen inicio en la época del imperio romano, época en la cual surge la rueda romana que era de eje horizontal y la rueda griega de eje vertical implementada en molinos, ver Ilustración 7 (Vázquez, 2010).

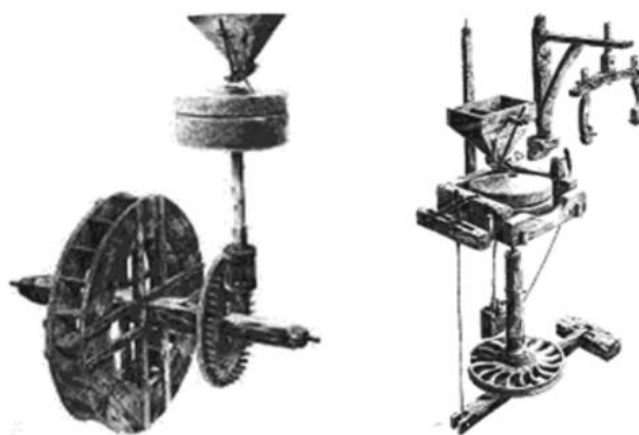


Ilustración 7. Rueda Romana (izquierda), Rueda Griega (derecha).

Fuente. Sánchez (2012).

5.3.1.1 Tipos de rueda hidráulica

Las ruedas hidráulicas en la antigüedad se utilizaron para la elevación de agua y más adelante para la generación de energía. Se inició con la utilización de la rueda persa o saquia, una rueda grande instalada sobre un eje horizontal con vasijas ubicadas alrededor del perímetro, de tal manera que elevara el agua a una altura mayor que la de su diámetro, para utilizar en la agricultura u otros usos; además de la rueda hidráulica se utilizaba el tornillo de Arquímedes para la elevación del agua (Sánchez, 2012).

En el siglo I, durante el Imperio romano, Vitrubio desarrolló la rueda hidráulica llamada rota aquaria, que estaba conformada por una llanta de eje horizontal donde se ubicaban unos cangilones con una serie de radios que le brindaban rigidez y funcionaban como una rueda de empuje inferior. En el siglo II, en zonas montañosas se empezaron a utilizar las ruedas de empuje superior, las cuales suministraban una energía adicional a causa de la caída del agua sobre los cangilones.

En la Edad Media las ruedas hidráulicas y los molinos tuvieron tanto auge que se utilizaban para varias labores de la época, se utilizaron las ruedas romanas (eje horizontal) y las ruedas griegas (eje vertical). Paulatinamente se fue produciendo la transición de la rueda hidráulica a la turbina; en el siglo XVIII, el ingeniero civil británico John Smeaton demostró que la rueda de empuje superior (ver Ilustración 8) era más eficaz que las demás.



Ilustración 8. Ruedas hidráulicas de empuje superior, empuje lateral y empuje inferior.

Fuente. Sánchez (2012).

A comienzos del siglo XIX Benoit Fourneyron diseñó turbinas con potencias de 60 CV; más adelante, en 1837, Henschel y Jonval crearon las turbinas que llevan sus nombres; James B. Francis diseñó en 1849 la turbina Francis realizando una mejora de la turbina del Fourneyron; años más tarde, en 1889, se empezó a utilizar la turbina Pelton, creada por el ingeniero Lester Allen Pelton; a comienzos del siglo XX el ingeniero Viktor Kaplan diseñó las turbinas hélice y Kaplan; y, en los siguientes años fueron creadas las turbinas Turgo, Banki, Dériaz y Bulbo (Sánchez, 2012).

5.3.1.2 Rueda hidráulica ROCHFER

La primera bomba del tipo rueda hidráulica ROCHFER fue fabricada en 1947 por el Señor Antonio Rocha, “inventor y autodidacta que tenía un taller de inventos, reparaciones y mantenimiento de equipos mecánicos y eléctricos”. Con el pasar de los años la bomba se consideró como una máquina innovadora y beneficiosa, llegando a ser todo un éxito en las fincas y hasta la llamaron the Bomb Toto, en honor a su creador. La fábrica se consolidó muy rápido, los diseños de las bombas fueron patentadas y se hicieron inversiones para mejorar y fortalecer los procesos de producción y máquinas nuevas (ROCHFER, 2015).

Las ruedas hidráulicas son máquinas que aprovechan la energía hidráulica generada por el peso del agua sobre los álabes de la rueda; el agua es captada de un río y transportada por medio de una tubería hasta la rueda, para luego caer en las paletas, que están ubicadas en el perímetro de la rueda, haciéndola girar junto con el eje horizontal de la bomba; este último tiene acoplada una leva, la cual convierte un movimiento axial en lineal, en donde el pistón succiona e impulsa el líquido hasta la altura deseada (Vázquez, 2010; ROCHFER, 2015).

Para la implementación de las bombas hidráulicas ROCHFER se deben tener en cuenta varios factores, tales como, el caudal de accionamiento de la rueda, la altura a bombear y el volumen almacenado. Las bombas ROCHFER tienen la ventaja de no requerir energía eléctrica ni combustibles para su accionamiento; por lo tanto, las emisiones de GEI y los costos de operación son mínimos; además, la disponibilidad de agua es de todo el día (Godoy, 2001; ROCHFER, 2015), ver Ilustración 9.



Ilustración 9. Rueda hidráulica ROCHFER.

Fuente. ROCHFER (2015).

La rueda hidráulica ROCHFER pueden ser instalada en paralelo si se requiere mayor caudal o en serie si se requiere mayor altura manométrica; los modelos de estas bombas son MSG-42, MSG-42F, MSG-51, MSG-70, MSG-76 y MSG-89.

La bomba ROCHFER más pequeña es la modelo MSG-42 de altura 80 cm y 25 cm de ancho, tiene la capacidad de bombear agua desde 30 hasta 120 m de altura, impulsando caudales desde 2200 hasta 8000 litros/día, con un caudal de accionamiento que varía entre 4 y 15 lps.

La bomba ROCHFER más grande es la modelo MSG-89, de altura 220 cm y 36 o 47 cm de ancho, tiene la capacidad de bombear agua desde 30 hasta 90 m de altura, impulsando un volumen de agua desde 31000 hasta aproximadamente 80000 litros/día, con un caudal de accionamiento que varía entre 10 y 40 lps (ROCHFER, 2015). La Ilustración 10 muestra la disposición del sistema mediante la rueda ROCHFER.

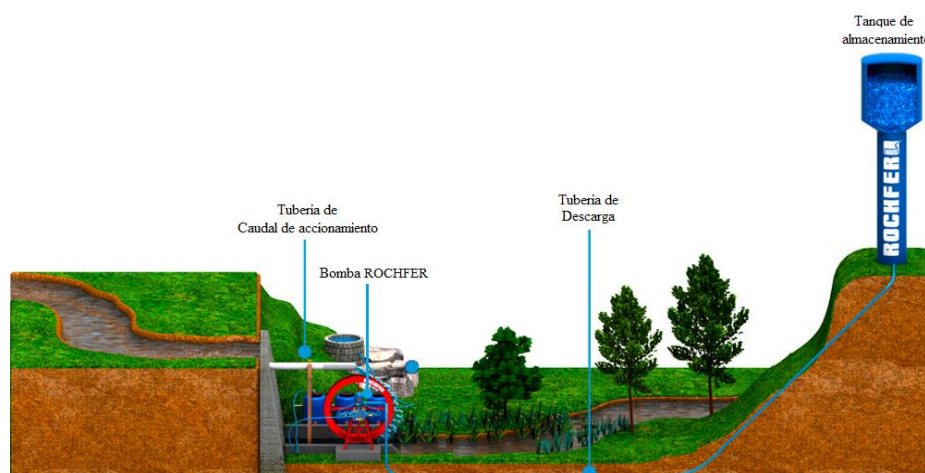


Ilustración 10. Bombeo con ruedas hidráulicas ROCHFER.

Fuente. ROCHFER (2015).

5.4 Energía solar

La energía solar proviene de la radiación del sol; de ésta obtenemos dos energías fundamentales para la vida, la luz y el calor, las cuales son muy importantes para las plantas, los animales y los seres humanos. Esta energía se puede aprovechar mediante paneles térmicos y paneles fotovoltaicos, los cuales son utilizados para calentar agua y generar electricidad, respectivamente (Roldán, 2013).

Hoy en día la energía solar se utiliza para la generación de energía eléctrica para las viviendas (uso doméstico) y para bombear agua para el riego y el ganado. Un sistema accionado por energía solar es económicamente factible cuando la cantidad de agua requerida por el cultivo es baja y la altura a bombear es pequeña; por ejemplo, cuando utilizamos un riego por goteo donde la cantidad de agua aplicada es eficiente en comparación con otros sistemas de riego (Enciso y Mecke, 2004).

5.4.1 Radiación solar

Se forma a partir de reacciones químicas al interior del sol, generándose una pérdida de masa debido a las altas temperaturas, que luego se convierten en energía llegando a la tierra como radiación solar (Méndez, 2011). Hay dos términos muy utilizados en la energía solar y son la irradiancia y la irradiación. La irradiancia solar es la potencia recibida por unidad de superficie (W/m^2) y la irradiación solar es la energía recibida por unidad de superficie durante un lapso de tiempo ($\text{W}\cdot\text{h}/\text{m}^2$). Los tipos de radiación solar que llegan a la superficie de la tierra son:

- Radiación directa: es la radiación que recibe un cuerpo directamente desde el sol sin que cambie de dirección al pasar por la atmósfera.
- Radiación difusa: se le cambia su dirección debido a la reflexión y difusión en la atmósfera y nubes.
- Radiación reflejada: es la radiación directa y difusa que llega a un objeto a partir de la reflexión sobre el suelo u objetos cercanos.

5.4.2 Sistema fotovoltaico

Es un conjunto de elementos cuya finalidad es generar energía eléctrica para ser utilizada con varios propósitos. Entre los elementos que conforman el sistema se encuentran los paneles solares fotovoltaicos, el controlador de carga, la batería y el inversor (ver Ilustración 11). Los tipos de instalaciones que se encuentran en sistemas fotovoltaicos se clasifican en autónomos, interconectados o híbridos.

Es importante que no se presenten sombras en estas instalaciones y que se capte la mayor radiación solar posible debido a que la generación de la energía eléctrica es proporcional al caudal, es decir, cuando la radiación solar es baja la energía producida por los paneles también lo será, al igual que el caudal bombeado; pero cuando la radiación solar es alta la energía será máxima, al igual que el caudal bombeado.

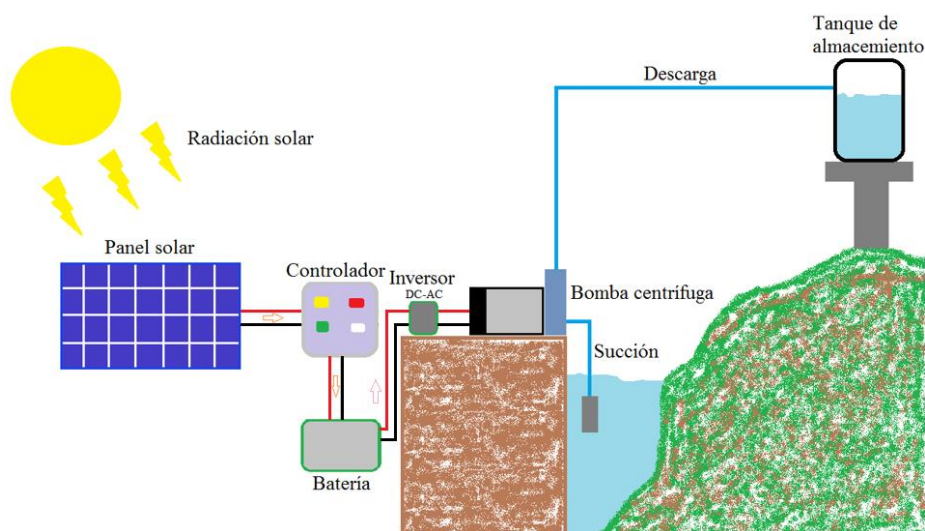


Ilustración 11. Bombeo con energía solar fotovoltaica.

Fuente. Propia (2015).

Para conocer el punto de máxima potencia generada por los paneles fotovoltaicos se tiene la curva característica del panel, en donde se grafica la intensidad vs la tensión a la que opera el panel, a una determinada irradiancia solar y temperatura constante (ver Ilustración 12).

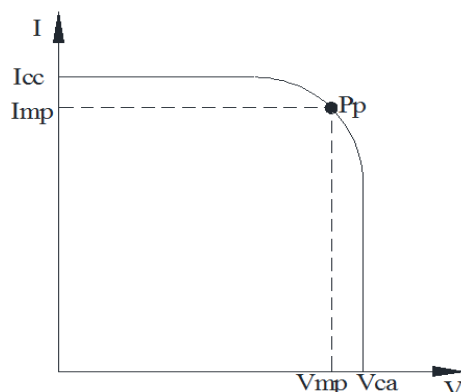


Ilustración 12. Curva característica del módulo fotovoltaico.

Fuente. Méndez et al. (2011).

Parámetros que definen un panel solar fotovoltaico:

- **Potencia nominal o máxima (P_p):** potencia máxima del panel en condiciones estándar de medida (CEM): irradiancia solar de 1000 W/m^2 y temperatura de la célula de 25°C .
- **Corriente de cortocircuito (I_{cc}):** máxima corriente que puede suministrar el panel fotovoltaico a tensión de salida nula (tensión= 0 V). Se mide conectando un amperímetro a la salida del panel fotovoltaico.
- **Tensión en circuito abierto (V_{ca}):** máxima tensión que puede suministrar el panel fotovoltaico a corriente nula (corriente= 0 A). Se mide conectando un voltímetro entre bornes.
- **Corriente a máxima potencia (I_{mp}):** es la corriente que suministra el panel fotovoltaico en el punto de máxima potencia a CEM; se emplea como corriente nominal.
- **Tensión a máxima potencia (V_{mp}):** es la tensión que suministra el panel fotovoltaico en el punto de máxima potencia a CEM; se emplea como tensión nominal.

5.4.2.1 Panel solar

Está conformado por un conjunto de celdas solares, que son agrupadas con la finalidad de convertir la energía luminosa del sol en energía eléctrica a través del silicio que actúa como material semiconductor, siendo los paneles más comercializados y utilizados los de silicio monocristalino, silicio policristalino y silicio amorfo. Aunque hay otros materiales que son utilizados como semiconductores, como el arseniuro de galio, el telurio de cadmio, el diseleniuro de cobre indio, y el tandem; la vida útil de los paneles fotovoltaicos oscila entre 25 y 30 años, y no requiere de constante mantenimiento; sólo se debe limpiar cuando haya polvo (López de Ponce, 2014).

- Silicio monocristalino

Se obtiene a partir de un solo lingote de silicio de alta pureza, rendimiento del 24.7% en laboratorio y 16% en panel comercial, son los más eficientes respecto a los demás paneles y

con mayor vida útil; aunque en la actualidad en pruebas de laboratorio estas eficiencias se han ido mejorando debido a nuevos materiales de fabricación y tecnologías que en conjunto con los paneles incrementan notablemente su eficiencia, pero así se incrementa su coste.

- *Silicio policristalino*

Utilizan materiales similares a los paneles de silicio monocristalino, la única diferencia es el proceso de cristalización en el cual se enfría de manera artificial el silicio, rompiendo su estructura formando pequeños cristales que son utilizados en la creación del panel, rendimiento del 19.8% en laboratorio y 14% en panel comercial.

- *Silicio amorfo*

Este material no sigue una estructura cristalina; son utilizados con frecuencia en aparatos electrónicos y portátiles, rendimiento del 13% en laboratorio y 8% en panel comercial.

5.4.2.2 *Controlador de carga*

Su función es regular la energía eléctrica que entrega los módulos a la batería, evitando sobrecargas por picos de corriente o sobre descargas en ellas, garantizando que reciban correctamente la relación tensión/corriente para un óptimo funcionamiento. Cuando hay días de radiación solar alta, los paneles solares generan la máxima potencia y ahí es cuando el controlador se encarga de que los aparatos reciban una corriente segura y constante; existen dos tipos de controladores de carga: PWM (modulada por ancho de pulsos) y MPPT (seguimiento del punto de máxima potencia) (Bridgewater, 2009).

- *Controlador de carga PWM*

Funciona como un interruptor entre los módulos fotovoltaicos y la batería. Utilizando este controlador los paneles están obligados a operar a la tensión de la batería, ocasionando bajos rendimientos respecto al punto de máxima potencia del panel y siendo los más económicos en el mercado.

- *Controlador de carga MPPT*

Este tipo de controladores tiene un seguidor de punto de máxima potencia y un convertidor CC-CC de alta tensión a baja tensión para la carga de la batería. Utiliza el 100% de la energía que puede generar los paneles trabajando en la máxima potencia, este controlador es más costoso que el controlador PWM, pero más productivo.

5.4.2.3 *Batería*

Se encargan de almacenar la energía eléctrica generada por los paneles fotovoltaicos, son utilizadas en lugares donde los días nublados son prolongados y donde se deba garantizar energía eléctrica todos los días. En sistemas de bombeo para riego no es común utilizar baterías debido al incremento del coste del proyecto, por ende, en períodos de máxima irradiación se aprovecha para acumular agua en tanques de almacenamiento con el fin de utilizarlo en períodos nublados; las baterías en promedio tienen una vida útil de 3 a 5 años, esto dependerá de la profundidad de descarga a la que sea sometida (Bridgewater, 2009).

Las baterías utilizadas en los sistemas solares son las líquidas y tipo VRLA (ácido-plomo) donde se encuentran de gel y AGM (separador de vidrio absorbente), la primera el ácido se encuentra en gel lo que impide que el líquido que contiene se salga y resisten a bajas temperaturas. Las AGM tienen entre las placas una malla de fibra de vidrio que ayuda a detener el electrolito, resisten las bajas temperaturas y su eficiencia es del 95%, este tipo de baterías son más costosas comparadas a las baterías líquidas.

5.4.2.4 *Inversor*

Se utiliza para convertir la energía que entrega el panel de corriente continua (CC) a corriente alterna (CA) como es utilizada generalmente en los aparatos eléctricos. Existen dos tipos de inversores, el de conmutación natural utilizado en sistemas conectados a la red eléctrica y el de conmutación forzada implementado en sistemas autónomos, la eficiencia de los inversores está por encima del 90% (Bridgewater, 2009). Los inversores se pueden clasificar según la forma de la onda, entre ellos se encuentra el de onda cuadrada, cuadrada modulada, senoidal pura y senoidal modificada.

5.4.3 *Instalación en sistemas solares*

5.4.3.1 *Sistemas solares autónomos*

Estos sistemas son utilizados en poblaciones donde no hay posibilidad de acceder a la energía eléctrica, especialmente en zonas rurales o en casos donde se desea independizar de la red eléctrica.

5.4.3.2 *Sistemas solares interconectados*

Se instala en conjunto con la red eléctrica pública, posee un medidor bidireccional que cuantifica la energía producida por los paneles y la aportada por la red eléctrica pública, cuando los paneles generan energía es utilizada en la casa para encender todo tipo de electrodomésticos y cuando hay exceso de producción se conduce hacia la red pública, en caso contrario de no generar energía como sucede en las horas de la noche, se consume energía de la red eléctrica. Finalmente se realiza un balance energético para cuantificar el consumo de energía y ver los ahorros obtenidos.

5.4.3.3 *Sistemas híbridos*

Trabajan en conjunto con otra fuente de energía, entre las que se pueden encontrar energías renovables y no renovables. Estos sistemas son más fiables que los dos anteriores debido a que no se depende de una sola fuente de energía; por ejemplo, en períodos nublados, cuando los paneles solares proporcionan poca potencia, se pueden utilizar aerogeneradores para la producción de energía eléctrica o implementar otro tipo de energía que produzca la electricidad requerida para colocar en funcionamiento los aparatos electrónicos y eléctricos.

5.4.4 *Posición de los paneles*

Gran parte de la energía generada por el sol incide en línea recta, por lo cual si el panel está perpendicular a los rayos del sol captará más energía. Por otro lado, debido a que el sol está en constante movimiento es necesario encontrar un criterio para determinar la orientación

del panel fotovoltaico, la cual está dada por dos ángulos; la orientación (α) y la inclinación (β), como se observa en la Ilustración 13.

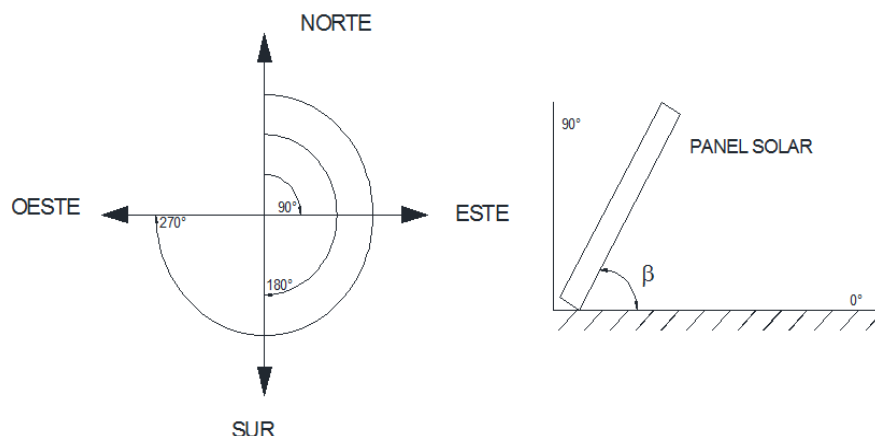


Ilustración 13. Orientación (α) y ángulo de inclinación (β) del panel solar.

Fuente. Propia (2015).

5.4.4.1 Orientación

Es el ángulo que mide la declinación respecto al sur en el hemisferio norte y respecto al norte en el hemisferio sur. Según Garcia (1999), para que el panel capte la mayor radiación el modulo solar debe estar girado hacia el ecuador terrestre. Se debe evitar en lo posible que se generen sombras sobre los paneles (edificaciones, arboles, muros, entre otros.) y las sombras que se producen entre ellos, es aceptable dirigir los paneles 20° hacia el Este o el Oeste ($\alpha = \pm 20^\circ$), cuando se presenten sombras o las condiciones del sitio fuerzan a ello.

5.4.4.2 Inclinación

Es el ángulo beta (β) que se forma entre la superficie del panel y el plano horizontal. La altura del sol cada día varía dependiendo de las estaciones del año, alcanzando su altura máxima en el día del solsticio de verano y su mínimo en el solsticio de invierno; debido a esto la instalación de los paneles pueden ser de soporte fijo, con seguimiento manual o con seguimiento solar siendo este último el más costoso; el más usado es el de soporte fijo por ser menos costoso (Garcia, 1999).

Se tienen los siguientes criterios para las instalaciones:

- Para consumos constantes a lo largo del año se usan inclinaciones iguales al valor absoluto de la latitud del lugar (ángulo Φ) incrementado en 10° ($\beta = |\Phi| + 10^\circ$).
- Para consumos inferiores en invierno puede usarse como inclinación el valor de la latitud del sitio y se optimiza para los períodos de primavera y otoño ($\beta = |\Phi|$).

Garcia (1999) recomienda que la inclinación del panel nunca sea menor a 15° ; debido a que estos valores son aproximados, se deben realizar los cálculos para diferentes inclinaciones posibles y seleccionar la que utilice menos paneles solares.

5.5 Energías no renovables

Estas fuentes de energías se encuentran en el mundo de manera limitada y a comparación del tiempo de formación, el período de utilización es muy corto y de forma rápida. Entre las energías no renovables se encuentran los combustibles fósiles, como el petróleo, el carbón y el gas natural, y la energía nuclear por fisión y fusión nuclear (Moro, 2010).

5.5.1 Combustibles fósiles

Son reservas de carbono que tomaron decenas o cientos de millones de años en formarse a partir de residuos de seres vivos que quedaron hace millones de años. La desventaja de esta fuente de energía es que produce CO₂ y otros gases al momento de su combustión, afectando la capa de ozono e incrementando el cambio climático. El carbón fue de gran importancia en la Revolución Industrial del siglo XIX, el carbón tiene origen en el período del Carbonífero hace más de 300 millones de años, producido a partir de enormes masas de vegetales; de forma similar, el petróleo y el gas natural también tiene origen vegetal y animal, generados a partir de algas y plancton de los antiguos lagos y mares (Moro, 2010).

5.5.2 Energía nuclear

La energía nuclear se obtiene por fisión nuclear en reactores, en donde se libera la energía almacenada del átomo de uranio en forma gradual y controlada. La parte principal de este proceso es el núcleo del reactor, que consta de 100 toneladas de uranio almacenados en conductos de 3.66 metros colocados verticalmente. Este núcleo se controla mediante varas de cadmio o boro, los cuales absorben los neutrones y pueden controlar la reacción formada (Kaku y Trainer, 1986).

El proceso comienza desde la circulación del refrigerante o agua alrededor del núcleo para disminuir el calor proporcionado por la fisión del uranio; este calor liberado convierte el líquido en vapor, el cual se utiliza para accionar los álabes de la turbina, a velocidades altas, en donde convierten la energía eléctrica por inducción, “cuando una rueda metálica gira en torno de un campo magnético”. Al final, el vapor se condensa y circula nuevamente alrededor del núcleo (Kaku y Trainer, 1986).

La principal ventaja de la energía nuclear es que no emiten GEI y la desventaja es el alto riesgo para la salud de las personas y el medio ambiente debido a la radiación emitida, pues si llegara a ocurrir un accidente sería una catástrofe con daños irreversibles; en ocasiones se usaron para fines maléficos, como en la segunda guerra mundial, cuando Estados Unidos atacó a Japón con dos bombas atómicas ocasionando daños irreparables en las ciudades de Hiroshima y Nagasaki.

6 METODOLOGÍA

6.1 Localización y descripción

La finca de estudio se encuentra ubicada en la vereda Betania con coordenadas de Latitud: 3°45'15.35"N y longitud: 76°10'30.22"O, perteneciente al corregimiento de Juntas en el municipio de Ginebra, Valle del Cauca. Este municipio se caracteriza por la actividad agrícola, siendo los principales productos cultivados los frutales, uva, caña de azúcar, legumbres, café y soya; el municipio tiene una extensión total de 313 Km² y un área urbana de 89.33 Km², con altitud en la cabecera municipal de 1100 m.s.n.m, temperatura media de 23 °C, precipitación promedio anual inferior a los 1200 mm, brillo solar entre 4 y 5 horas promedio anual, velocidad de viento de 1.5 a 2.0 m/s promedio anual (ver Ilustración 14).

Gran parte del corregimiento de Juntas presenta clima medio húmedo, con altitudes entre los 1000 y 2000 m.s.n.m. y precipitación promedio anual en un rango de 1200 mm a 1800 mm; exceptuando el noroccidente de Juntas, donde el clima es frío húmedo con altitudes entre los 2000 y 3000 m.s.n.m. y precipitación promedio anual entre 1200 mm y 2000 mm.

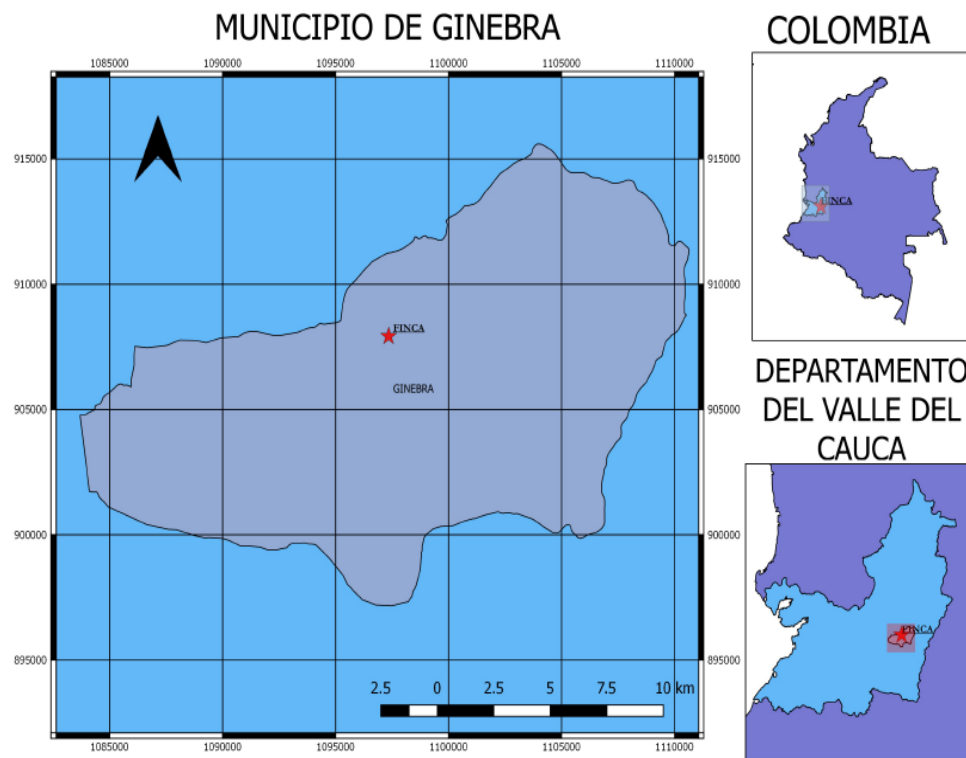


Ilustración 14. Ubicación del predio Asociación Finca en Betania SRC 3115.

Fuente: Propia (2016).

6.2 Recopilación de información secundaria

Para el desarrollo del proyecto se recopiló, analizó y procesó información existente relacionada con las características del sistema de riego por goteo diseñado e instalado en el predio Asociación Finca ubicada en la Vereda Betania.

6.2.1 Información topográfica

Se empleó el GPS Trimble serie Juno T41/5, con una precisión después de la corrección entre 2 y 4 metros en coordenadas planas. Se utilizó los softwares Trimble TerraSync y GPS Pathfinder Office licenciados por el grupo REGAR de la Universidad del Valle; el primero para la toma de datos y el segundo para la extracción, corrección y exportación de los datos tomados en campo. La corrección se realizó con los datos rinex de la estación geodésica IGAC de Cali, Valle del Cauca; posterior a eso se exportaron los puntos a formato DXF y se realizó el perfil del terreno para la tubería de impulsión en el software AutoCAD Civil 3D.

6.2.2 Información del sistema de riego por goteo

El sistema de riego implementado en la finca posee un riego localizado de alta frecuencia con eficiencias de aplicación entre el 70 y 95%. Para el cálculo de la demanda hídrica se utilizó información de la estación pluviométrica Los Bancos y la estación climatológica Monteloro del catálogo de la CVC. En el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) se utilizó el método de García-López, teniendo en cuenta un análisis de excedencia del 75% para la precipitación efectiva y del 50% para la temperatura media y humedad relativa, datos suministrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones climáticas en el municipio de Ginebra

Variable	Unidad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Pe	mm	22.6	25.8	46.8	58.2	49.3	26.7	15.1	12.7	33.9	63.7	69	49.3
T media (°C)	°C	18.4	18.4	18.5	18.6	19	18.9	19.3	19.7	18.8	18.5	18.1	18.3
Hum rel HR	%	82	81	81	82.4	83.2	80	79	79	78.9	86	83	85
Días del mes		31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31

Fuente: REGAR (2014).

Para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo mensual, se utilizó la ET_o y el coeficiente del cultivo de zapallo (K_c=1), obteniendo como mes crítico agosto, ver Tabla 2.

Tabla 2. Evapotranspiración de referencia mensual y diaria del cultivo de zapallo

Variable	Unidad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
ET _o	mm/día	2.3	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	2.7	2.8	2.6	2.2	2.2	2.2
ET _o	mm/mes	72	66.2	74.1	70.7	75.2	76.1	83.3	86.3	76.8	67.9	65.7	67.3
ET _c	mm/mes	72	66.2	74.1	70.7	75.2	76.1	83.3	86.3	76.8	67.9	65.7	67.3
ET _c	mm/día	2.3	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	2.7	2.8	2.6	2.2	2.2	2.2

Fuente: REGAR (2014).

La Tabla 3 presenta información general del cultivo como distancia entre planta y surco, profundidad efectiva de raíces, diámetro de sombra, clasificación del clima en la zona de estudio, necesidades totales y diarias y caudal continuo del proyecto.

Tabla 3. *Información general del cultivo de zapallo*

Parámetro	Resultado	Parámetro	Resultado	Parámetro	Resultado
Cultivo	Zapallo	Kc	1	Nn (mm/día)	2.6
Dis. Entre. Surco (m)	2	Eto (mm/día)	2.8	Eficiencia de aplicación	0.95
Dis. Entre. Planta (m)	2	Etc (mm/día)	2.8	Coeficiente uniformidad	0.9
Prof. raíces (m)	0.3	Clasif. Clima	Semihumedo	Necesid Totales (mm/día)	2.99
Cei (mmhos/cm)	0.5	%Área sombreada	0.79	Necesid Diarias (L/día-planta)	11.95
Diam. sombra (m)	2	Kl Prom	0.912	Caudal continuo [Modulo] (L/s-Ha)	0.35

Fuente: REGAR (2014).

Del diseño agronómico y el manual de operación del proyecto en Betania se recopilamos los siguientes datos: tiempo de riego de 35 min cada módulo, jornada de riego 6 horas, frecuencia de riego de 1 día; las tuberías de conducción, principal y múltiple se instaló tubería de 1 ¼ in. En los dos sistemas de riego se utilizó un total de 3985 m de cinta tipo drip tape, 16 mm de diámetro nominal calibre 8000, otras características de la cinta se observan en la Tabla 4.

Tabla 4. *Características de la cinta de goteo implementada en Betania*

Parámetro	Resultado
Tipo de Cinta	Drip Tape
Diámetro nominal (mm)	16
Espesor de pared (mil)	8
No emisores x metro (c/u 20 cm)	5
Caudal promedio cinta goteo (lph) x emisor	0.79
Caudal x metro de cinta (lph)	3.95
Filtración (mesh)	150
Presión operativa recomendada (bar/PSI)	0.6/8
Coeficiente de uniformidad CU (%)	90
Coeficiente de variación CV	0.02
Emisores / planta	10
Ec. emisor	0.15h ^{0.97}

Fuente: REGAR (2014).

6.3 Cálculo del caudal de oferta

Debido a las condiciones del río Guabas poco profundo y de fondo resistente, se decidió realizar un aforo por vadeo utilizando un molinete mecánico de marca General Oceanics, modelo 2030, con hélice estándar de tipo taza cónica, tiene un contador incorporado de seis dígitos que registra los giros de la hélice, ver Ilustración 15. La calibración del molinete se realizó con un rotámetro en el canal del Laboratorio de Aguas y Suelos Agrícolas de la Universidad del Valle (LASA).



Ilustración 15. Molinete marca General Oceanics modelo 2030 estándar.

Fuente: Propia (2016).

El caudal con el molinete seleccionado se estimó con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Distancia (m)} = \frac{\text{diferencia en los conteos (x) } 26873}{999999}, \text{ Velocidad } \left(\frac{\text{m}}{\text{seg}} \right) = \frac{\text{Distancia (m)}}{\text{tiempo (seg)}}$$

$Q = V A$, donde: A = Área transversal en el punto de medición [m^2].

En el aforo por vadeo se utilizaron los siguientes materiales y equipos: cinta métrica, varilla de vadeo, cronómetro, molinete, cuerda y libreta de registro.

Procedimiento:

1. **Colocación de línea guía:** se ancló una estaca en la margen izquierda y otra en la margen derecha del río para colocar una cuerda perpendicular al flujo, la cual sirvió de guía para la división del cauce.
2. **Preparación del equipo hidrométrico:** para el molinete empleado se inyectó agua al interior del molinete por medio de una jeringa, poco a poco para no generar bolsas de aire, finalizado el proceso se sujetó a la varilla de vadeo.
3. **Medición del ancho del río:** con una cinta métrica se midió el ancho del cauce.
4. **Distanciamiento entre verticales:** se determinó el número de verticales utilizando los parámetros establecidos en la Tabla 5.

Tabla 5. Número de laterales ubicadas en el río

Ancho del canal (m)	No. de verticales
0 – 0.5	3 a 4
0.5 – 1	4 a 5
1 – 3	5 a 8
3 – 5	8 a 10
5 – 10	10 a 20
Más de 10	20 o más

Fuente: Norma ISO 748 (1997).

5. **Medición de la profundidad del agua en las verticales:** con la varilla de vadeo se midió en cada vertical y a la mitad del cauce la profundidad del agua.
6. **Medición de la velocidad de flujo:** La profundidad del río resultó menor a 60 cm, por lo cual se escogió el método de un punto y se midió la velocidad al 60%.
7. **Cálculo del caudal:** Se calculó el caudal del río Guabas utilizando el método de la sección media, ver Ilustración 16. Con la ecuación 1 se calculó el caudal unitario de cada franja y la sumatoria de todos los caudales es el caudal total en el río (ecuación 2).

Ecuación 1: $q = \left(\frac{\bar{v}_i + \bar{v}_{i+1}}{2} \right) \left(\frac{d_i + d_{i+1}}{2} \right) \times b$ Ecuación 2: $Q = \sum_{i=1}^n q_i$ (n: número de franjas en la sección transversal del río)

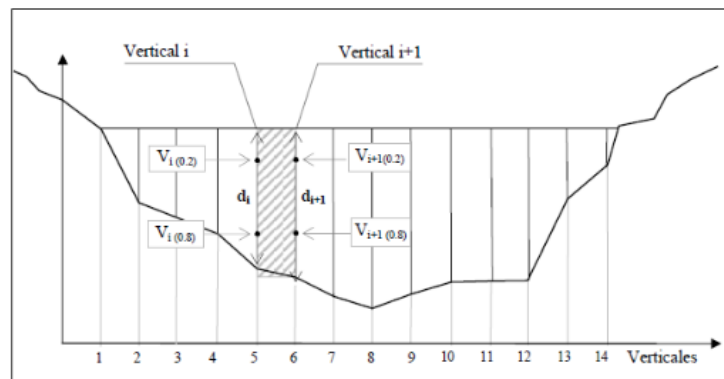


Ilustración 16. Método de la sección media en ríos.

Fuente: Ramírez et al. (2005).

6.4 Cálculo de la radiación solar

La determinación de la radiación solar se realizó a partir de la estación Tenerife, ubicada en las coordenadas latitud: 3.73, longitud: -76.07 y elevación: 2628.0 msnm; la selección de esta estación se debió principalmente a que la estación Monteloro, con la cual se hicieron los cálculos de demanda hídrica, no presenta datos de brillo solar. La estación Tenerife es la más cercana al punto de bombeo, ubicada en la cuenca alta del río Amaime-Nima, de la cual se tomaron los registros mensuales multianuales de brillo solar (ver Anexo 1).

6.4.1.1 Estimación de datos faltantes

Debido a que la información disponible de brillo solar presentó datos faltantes se utilizó el Método Racional Deductivo (Guevara, 2003) (Campos, 1998) para completar los registros faltantes, mediante el siguiente proceso:

1. Se calculó la sumatoria y el promedio en filas y columnas de los n años (años completos y faltantes de datos).
2. Se eliminaron los años con meses de datos faltantes, y se determinó la sumatoria y el promedio en filas y columnas.
3. Se determinó en todos los años completos los porcentajes mensuales de brillo solar, el cual fue la división entre el brillo mensual y el promedio mensual calculado en el paso 2 y por 100. En la suma y el promedio de los porcentajes calculados se deben de obtener valores de 1200 y 100, respectivamente.
4. Todos los porcentajes mensuales de brillo solar de un mismo mes se adicionan y se divide el resultado entre el número de años completos; es decir, se determina el porcentaje promedio que se denomina S_j , con j variando desde 1 hasta 12.
5. El método considera que los meses con datos faltantes tendrán un porcentaje igual al porcentaje promedio (S_j). Por lo tanto se tiene:

$$Br_j = \frac{\sum Br}{(1200 - \sum S_j)} * S_j$$

Donde:

j: mes sin dato

Br_j : brillo solar mensual desconocido en cada año incompleto

$\sum S_j$: suma de los porcentajes promedio de los meses donde el brillo solar se desconoce

$\sum Br$: suma del brillo solar mensual conocidos en los años incompletos

S_j : porcentaje promedio asignado

6.4.1.2 Cálculo de probabilidad de excedencia

Se aplicó el método de Weibull con el fin de estimar un margen de seguridad respecto al comportamiento climático de la variable en estudio (brillo solar); se calcularon las probabilidades al 40,50, 60 y 75%, en el cual se consideró el 75% de probabilidad para el mes más crítico. La probabilidad de excedencia (W) se calculó de la siguiente manera:

$$W = \left[\frac{m}{(n+1)} \right] * 100$$

Donde:

W: probabilidad de excedencia del evento (%)

m: orden asignado a cada año comenzando en uno

n: número de años en la serie.

6.5 Diseño de bocatoma con rejilla de fondo

La bocatoma con rejilla de fondo se compone de un azud con una rejilla fina posicionada horizontalmente con una pequeña inclinación, una cámara de recolección, vertedero de excesos, tubería de excesos y conducción bocatoma-desarenador como se muestra en la

Ilustración 17; adicionalmente se tiene el desarenador y la conducción del desarenador al pozo de succión de la bomba (Krochin, 1978). Siguiendo la metodología que propone López (1995) se diseñó cada uno de los componentes mencionados.

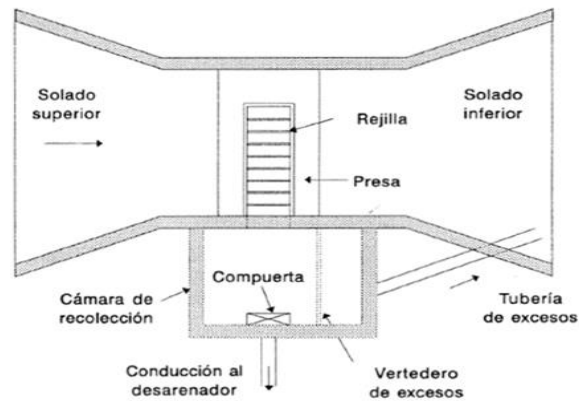


Ilustración 17. Bocatoma con rejilla de fondo (planta).

Fuente: López, (1995).

6.5.1 Azud

Para el diseño del azud (ver Ilustración 18) se calcularon los siguientes parámetros:

- Lámina de agua sobre el azud: $H = \left(\frac{Q}{1.84L}\right)^{2/3}$ (L: longitud del azud, valor a criterio del diseñador siempre y cuando la velocidad sobre el azud sea mayor a 0.3 m/s)
- Ancho del azud corregido: $L' = L - 0.1nH$ (n: número de contracciones laterales)
- Velocidad del agua sobre el azud: $V_r = \frac{Q}{L'H}$ ($0.3 < V_r < 3.0$ m/s)

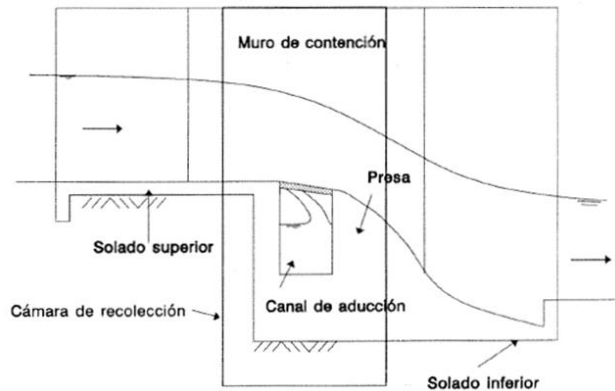


Ilustración 18. Bocatoma con rejilla de fondo (corte longitudinal).

Fuente: López, (1995).

6.5.2 Rejilla y canal de aducción

La rejilla debe tener un ancho mínimo de 0.40 m para facilitar la limpieza y el canal de aducción debe tener una pendiente entre 1 y 4% para que tenga una velocidad mínima apta y que facilite las labores de mantenimiento, como se muestra en la Ilustración 19.

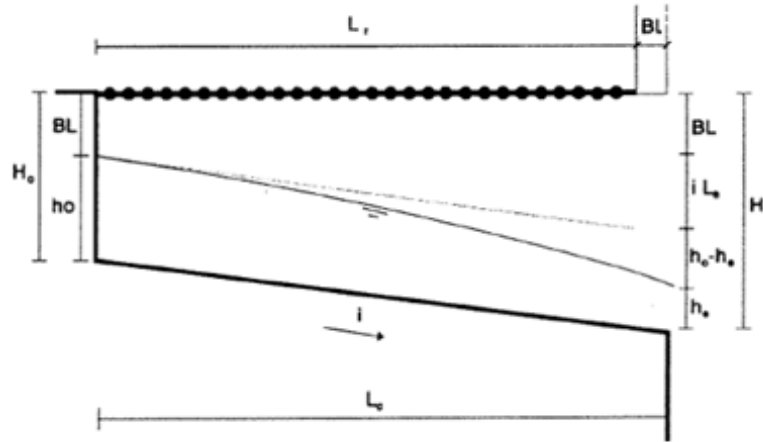


Ilustración 19. Perfil de la rejilla y canal de aducción.

Fuente: López, (1995).

El cálculo de la rejilla y el canal de aducción se realizaron de la siguiente manera:

- Alcance filo superior: $X_s = 0.36V_r^{2/3} + 0.6H^{4/7}$

- Alcance filo inferior: $X_i = 0.18V_r^{4/7} + 0.74H^{3/4}$

- Ancho del canal de aducción: $B = X_s + 0.1$

- Área neta: $A_n = \frac{Q}{0.9V_b}$ (V_b = velocidad entre barrotes)

- Longitud rejilla: $L_r = \frac{A_n(a+b)}{a \times B}$ (a: separación entre barrotes de 2-6 cm, b: ancho de los barrotes 1/2", 3/4", 1").

- Área neta: $A_n = \frac{a}{(a+b)} BL_r$

- Número de orificios: $N = \frac{A_n}{(a \times B)}$

- Área neta final: $A_n = a \cdot B \cdot N$

- Velocidad final entre los barrotes: $V_b = \frac{Q}{0.9A_n}$

- Longitud rejilla final: $L_r = \frac{A_n(a+b)}{a \times B}$

Niveles de agua en el canal de aducción

-Aguas abajo: $h_e = \left(\frac{Q^2}{g B^2}\right)^{1/3}$

-Longitud canal aducción: $L_c = L_r + \text{esp. muro (30 cm)}$

-Aguas arriba: $i = \text{pendiente en el canal}$, $h_o = \left[2h_e^2 + \left(h_e - \frac{iL_c}{3}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} - \frac{2}{3}iL_c$

-Altura al inicio del canal: $H_o = h_o + B.L$ (B.L: borde libre 15 cm)

-Altura al final del canal: $H_e = h_e + (h_o - h_e) + iL_c + B.L$

-Velocidad al final del canal: $V_e = \frac{Q}{B \times h_e}$, $0.3 \frac{m}{s} > V_e \frac{m}{s} < 3 \frac{m}{s}$

6.5.3 Cámara de recolección

Se puede realizar cuadrada o rectangular, con muros en concreto ciclópeo de 0.3 m de espesor. En la cámara estará ubicado un vertedero de excesos que entrega el agua a una tubería de excesos que tendrá como destino final el río como se observa en la Ilustración 20.

- Alcance filo superior: $X_s = 0.36V_e^{\frac{2}{3}} + 0.6h_e^{\frac{4}{7}}$

-Alcance filo inferior: $X_i = 0.18V_e^{\frac{4}{7}} + 0.74h_e^{\frac{3}{4}}$

-Ancho de la cámara: $B_{\text{cámara}} = X_s + 0.3$

-Altura máxima del muro: $H = \left(\frac{Q}{1.84L}\right)^{2/3}$

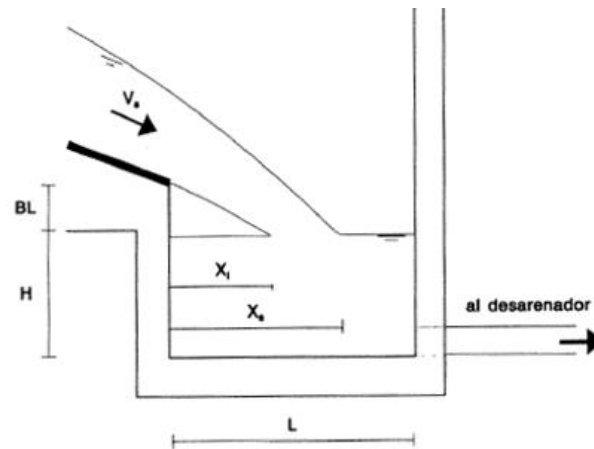


Ilustración 20. Corte de la cámara de recolección.

Fuente: López, (1995).

6.5.4 Caudal de excesos

Para el cálculo del caudal de excesos se tuvo en cuenta el caudal promedio del río.

-Altura de carga sobre el azud medio: $H = \left(\frac{Q}{1.84L}\right)^{2/3}$

-Caudal captado: $Q_{\text{captado}} = C_d A_n \sqrt{2gH}$ (coeficiente de descarga: $C_d = 0.3$)

-Caudal de excesos: $Q_{\text{exc}} = Q_{\text{captado}} - Q_{\text{diseño}}$

-Altura de excesos: $H_{\text{exc}} = \left(\frac{Q_{\text{exc}}}{1.84 \times L_{\text{cámara}}} \right)^{\frac{2}{3}}$

-Velocidad de excesos: $V_{\text{exc}} = \frac{Q_{\text{exc}}}{H_{\text{exc}} \times B_{\text{cámara}}}$

-Alcance del chorro superior: $X_s = 0.36 V_{\text{exc}}^{2/3} + 0.6 H_{\text{exc}}^{4/7}$

-Alcance del chorro inferior: $X_i = 0.18 V_{\text{exc}}^{4/7} + 0.74 H_{\text{exc}}^{3/4}$

-Ancho de la evacuación de excesos: $S = X_s + 0.1$

6.5.5 Tubería de excesos

Suponiendo una cota de descarga de 1639.10 msnm, se calculó la tubería de excesos:

- Pendiente de la tubería: $i = \frac{(\text{cota final} - \text{cota inicial})}{L} \times 100$

- Diámetro interno tubería: $D = \left(\frac{Q_{\text{exc}}}{0.2785 \times C^{*0.54}} \right)^{\left(\frac{1}{2.63} \right)}$ (C: coeficiente de Hazen Williams)

6.5.6 Conducción bocatoma-desarenador

- Pendiente de la tubería: $S = \frac{(\text{cota final} - \text{cota inicial})}{L} \times 100$

- Diámetro interno tubería: $D = 1.548 \left(\frac{n \times Q}{S^{(1/2)}} \right)^{\left(\frac{3}{8} \right)}$ (n: coeficiente de rugosidad de Manning)

- Caudal en la tubería llena: $Q_{\text{lleno}} = 0.312 \frac{D^{(8/3)} \times S^{(1/2)}}{n}$

- Velocidad en la tubería llena: $V_{\text{lleno}} = \frac{Q_{\text{lleno}}}{A_{\text{lleno}}}$ ($V_{\text{lleno}} > 0.6$ m/s se debe cumplir la condición)

-Relación entre $Q_{\text{diseño}}$ y Q_{lleno} : $\frac{Q_{\text{diseño}}}{Q_{\text{lleno}}}$

Del Anexo 2 se hallan las siguientes relaciones: $\frac{V_r}{V_{\text{lleno}}}$ y $\frac{d}{D}$

-Verificación de la cota a la salida de la bocatoma:

$$\text{Cota} = d + 1.5 \frac{v^2}{2g}$$

-Caudal de exceso máximo previsto:

$$Q_{\text{exc}} = Q_{\text{lleno}} - Q_{\text{diseño}}$$

6.5.7 Desarenador

La función del desarenador es remover las partículas de arena que han pasado por la rejilla. Consta de cinco zonas, la zona I se denomina cámara de aquietamiento, la zona II es la entrada al desarenador, la zona III donde se sedimentan todas las partículas restantes, la zona IV está conformada por una pantalla de salida sumergida, un vertedero de salida y un canal de recolección o tubería, y la zona V es el almacenamiento de lodos, como se presenta en la Ilustración 21.

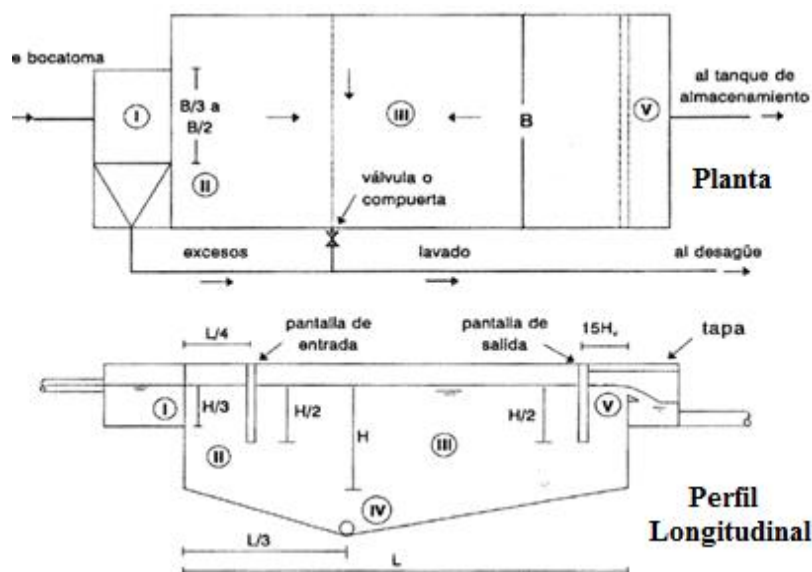


Ilustración 21. Desarenador vista en planta y perfil longitudinal.

Fuente: López (1995).

- Velocidad de sedimentación:

$$V_s = \frac{g}{18} \frac{(\rho_s - \rho)}{\mu} d^2$$

μ : viscosidad cinemática del agua (cm^2/s), ρ_s : densidad de la piedra o arena,

ρ : densidad del agua

g : gravedad ($981 \text{ cm}/\text{s}^2$)

Se debe tener en cuenta que la profundidad en el desarenador puede variar entre 1.5 y 4.5 m.

$$t = \frac{H}{V_s} = \frac{150}{0.212} \quad (H: \text{profundidad mínima del desarenador (150 cm)})$$

- Período de retención hidráulico: $\theta = (x)t$ (x : número de Hazen (V_s/V_o), ver Anexo 2)

- Volumen del tanque: $V = Q \times \theta$

- Área superficial del tanque: $A_s = \frac{V}{H}$

- Ancho: $B = \sqrt{\frac{A_s}{\text{relación } L}}$ - Largo: $\frac{L}{B} = \frac{\text{relación } L}{\text{relación } B}$

El ancho (B) debe ser tal que la velocidad en el vertedero de salida sea > 0.3 m/s.

-Carga hidráulica superficial: $q = \frac{Q}{A_s}$

- Velocidad de sedimentación teórica: $V_o = q$

- Diámetro teórico: $d_o = \sqrt{\frac{V_o \times 18 \times \mu}{g \times (\rho_s - \rho)}}$

-Velocidad horizontal: $V_h = \frac{V_o L}{H}$

-Velocidad horizontal máxima: $V_{h \max} = 20 * V_h$

-Velocidad resuspensión máxima: $V_{r \max} = \sqrt{\frac{8k}{f} g(\rho_s - \rho)d}$

Dónde: $k=0.04$ para sedimentación de arenas, $f= 0.03$

• **Cálculo de los elementos del desarenador**

Vertedero de salida

- Carga en el vertedero de salida: $H_v = \left(\frac{Q_d}{1.84 \times B} \right)^{\frac{2}{3}}$

- Velocidad en el vertedero de salida: $V_v = \frac{Q_d}{H_v \times B}$

- Alcance filo superior: $X_s = 0.36V_v^{\frac{2}{3}} + 0.6H_v^{\frac{4}{7}}$

Rebose de la cámara de aquietamiento

- Caudal de exceso: $Q_{exc} = Q_{lleno} - Q_{diseño} \rightarrow Q_{exc}$

- Altura de exceso: $H_{exc} = \left(\frac{Q_{exc}}{1.84 \times L_e} \right)^{\frac{2}{3}}$ (L_e : largo en la cámara de aquietamiento)

-Velocidad de excesos: $V_{exc} = \frac{Q_{exc}}{H_{exc} \times L_e}$

- Alcance filo superior: $X_s = 0.36V_{exc}^{\frac{2}{3}} + 0.6H_{exc}^{\frac{4}{7}}$

• Perfil hidráulico

$V_1 = V_r$, $V_2 = \frac{Q_d}{\text{ancho} \times \text{prof.}}$, $h_m = k \frac{\Delta V^2}{2g}$ (k : 0.1 debido a la disminución de la velocidad)

Pérdidas a la entrada de la zona de sedimentación:

$$V_1 = V_2 \text{ anterior del perfil hidráulico, } V_2 = V_h, h_m = k \frac{\Delta V^2}{2g}; (\Delta V = V_1 - V_2)$$

Las pérdidas en las pantallas inicial y final desarenador se calcularon como pérdidas de un orificio sumergido de grandes dimensiones, y como resultado arrojó un valor despreciable debido a que el caudal y el área son pequeños (López, 1995).

- Tubería de excesos

- Pendiente de la tubería: $J = m/m$ - Diámetro interno tubería: $D = \left(\frac{Q_{exc}}{0.2785 * C * J^{0.54}} \right)^{\frac{1}{2.63}}$

6.5.8 Conducción del desarenador al pozo de succión

Se calculó el caudal que va desde el desarenador hasta el pozo de succión por medio de la siguiente metodología:

- Diámetro interno de la tubería: $D = 1.548 \left(\frac{Q_n}{S^{1/2}} \right)^{3/8}$

- Caudal en la tubería llena: $Q_{lleno} = 0.312 \frac{D^{8/3} S^{1/2}}{n}$

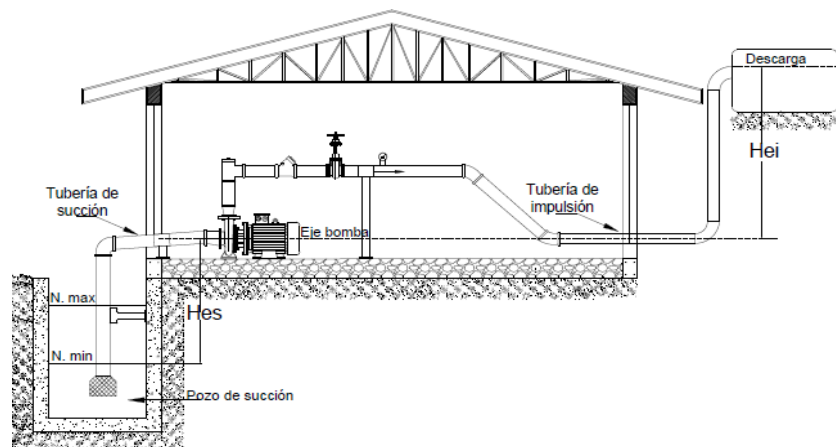
- Velocidad en la tubería llena: $V_{lleno} = \frac{Q_{lleno}}{A_{lleno}}$ (V_{lleno} debe cumplir la condición $> 0.6 \text{ m/s}$)

-Relación entre $Q_{diseño}$ y Q_{lleno} : $\frac{Q_{diseño}}{Q_{lleno}}$

6.6 Diseño del sistema de bombeo convencional

6.6.1 Parámetros de diseño

Del plano topográfico y del perfil del terreno que se presenta en el Anexo 10 se determinaron la cota mínima en el pozo de succión, la cota propuesta del eje de bomba, la cota en la descarga, la longitud de la tubería principal de succión y la longitud de la tubería principal de impuls n, como se observa en la Ilustración 22.



Ilustración 22. Caseta de bombeo convencional.

Fuente: Propia (2017).

- Cálculo de alturas estáticas

Hes= Cota propuesta del eje de bomba - Cota mínima en el pozo de succión

Hei= Cota en la impulsión - Cota propuesta del eje de bomba

$H_{ET} = H_{es} + H_{ei}$

- Parámetros de succión

Velocidad de succión (V_s) recomendada entre 1 y 1.5 m/s

Calculó del diámetro de succión: $d_s = \frac{4 \cdot Q_b}{\pi \cdot V_s}$

Chequeo de la velocidad de succión con el diámetro interno comercial de la tubería: $V_s = \frac{4 \cdot Q_b}{\pi \cdot d_s}$

Se calcularon las pérdidas por accesorios y en la tubería de succión utilizando la ecuación de Hazen-Williams, con longitud equivalente para cada accesorio.

$$h_{fs} = \frac{10,675 \cdot L \cdot Q^{1,85}}{C^{1,85} \cdot d^{4,87}}$$

Se calcularon las velocidades de entrada y salida de la bomba con: $V_{bs} = \frac{4 \cdot Q_b}{\pi \cdot d_{s \text{ bomba}}}$

- Carga dinámica de succión: CDTs

CDTs= Hes + hfs

Donde:

Altura estática de succión (*Hes*) [m], Pérdidas en la línea de succión (*hfs*) [m]

- Parámetros de impulsión

Velocidad de impulsión (V_i) recomendada entre 1.5 y 2.0 m/s y por regla general el diámetro de impulsión es un diámetro menor al de succión.

El chequeo de la velocidad de impulsión se realizó con el diámetro interno: $V_i = \frac{4 \cdot Q_b}{\pi \cdot d_i}$

Se calcularon las pérdidas por accesorios y tubería de impulsión utilizando la ecuación de Hazen-Williams, con longitud equivalente para cada accesorio.

- Carga dinámica de impulsión: CDTi

CDTi= Hei + hfi

Altura estática de impulsión (*Hei*) [m], Pérdidas en la línea de impulsión (*hfi*) [m]

- Carga dinámica total: CDT

CDT= CDTs + CDTi

6.6.2 Selección del equipo de bombeo

Para la selección de la bomba centrífuga eléctrica se analizaron varios catálogos de curvas características que se encuentran en el mercado como la RNI, HIDROMAC, BARNES, IHM, FRISTAM, SIHI, GOULDS, GRUNDFOS, entre otras.

- Potencia hidráulica: **Ph (kW)** = $\gamma Q H$

Peso específico del agua ($\gamma = 9800$) [N/m³], Caudal (Q) [m³/s], Altura dinámica total (H) [m]

- Potencia mecánica: **Pm (W)** = $(Ph) / (E_B E_M)$

Dónde: eficiencia de la bomba (E_B) y eficiencia del motor (E_M)

6.6.3 Punto real de operación del sistema (PRO)

La intercepción de la curva del sistema de tuberías y la curva de la bomba la cual es suministrada por el fabricante, se denomina como el punto real de operación de la bomba centrífuga seleccionada. Para la elaboración de la curva del sistema de tuberías se utilizó la siguiente ecuación:

$H_D = H_{ET} + QK^{1.85}$, donde:

H_{ET} = altura estática total, Q= caudal, $K^{1.85}$ = pérdidas en la línea de succión e impulsión (longitud equivalente).

6.6.4 Cavitación

NPSH requerido el fabricante lo suministra y el NPSH disponible se calcula de la siguiente manera:

$$NPSH_{disponible} = H_a - H_v - H_s - H_{fs}$$

Para que no se presente cavitación en la bomba se debió cumplir que el $NPSH_{disponible}$ fuera mayor que el $NPSH_{requerido}$ en 1.0 m de diferencia.

6.6.5 Sumergencia

Para evitar el paso de aire a la tubería de succión y tener un óptimo funcionamiento de la bomba, se ubicó la válvula de pie respecto al fondo del pozo de succión a una distancia que fue calculada de la siguiente manera: (S): $S \geq 2.5D_s + 0.1$

6.6.6 Pozo de succión

El volumen debe ser el equivalente a retener el caudal de bombeo de 3 a 5 minutos, con el fin de evitar sedimentación de partículas en el tanque. Tiempo de retención: $\theta = 3$ a 5 min.

- Volumen: $V = Q \times \theta$

- Área mínima: $A_{min} = 5 \times D_s$

- Distancia entre la válvula de pie y el fondo del pozo: $H_{vál-pozo}$

$$\text{-Altura del pozo} = (N_{\text{máx}} - N_{\text{min}}) + S + H_{\text{vál}} + H_{\text{vál-pozo}} + BL$$

$$\text{- Área del pozo: } A_{\text{pozo}} = \frac{\text{Volumen pozo}}{\text{Altura pozo}}$$

6.6.7 Caseta de bombeo

El diseño de la caseta de bombeo fue a criterio del diseñador con espacios pertinentes para la bomba, un lugar para el mantenimiento y herramientas, el lugar donde estará alojado el centro de control de motores para el encendido y apagado de la bomba.

6.7 Diseño del sistema de bombeo fotovoltaico

La bomba centrífuga para este diseño es la misma seleccionada en el bombeo por energía eléctrica dado que solo se cambió la fuente de energía. Se realizó el diseño de un sistema autónomo fotovoltaico debido a que se desea que los costos de operación del sistema sean mínimos, siguiendo la metodología de Méndez (2011).

6.7.1 Parámetros de diseño

- Consumo de energía

Se determinó el consumo de energía para el sistema (E_d), partiendo como base la potencia nominal del motor eléctrico que se seleccionó para la bomba centrífuga del bombeo eléctrico y se determinó cuántas horas estará en funcionamiento y las características del motor.

- Período de diseño

El período de diseño fotovoltaico se puede realizar para el mes de diciembre, julio o anual, eso depende si el mes de diciembre o julio sea el más crítico en radiación solar en el lugar del proyecto, o puede ser anual si el consumo de energía eléctrica será constante durante todo el año. Las constantes de diseño son: $K = 1.15$ (anual), $K = 1.0$ (julio) y $K = 1.7$ (diciembre).

- Orientación e inclinación óptimas

Debido a que la finca se encuentra ubicada en el hemisferio norte la orientación de los paneles solares fotovoltaicos se diseñaron orientados hacia el sur, esto se debe al movimiento del sol.

- Ángulo de inclinación óptimo en función del período de diseño, para consumos constantes a lo largo del año ($\beta_{\text{opt}} = |\Phi| + 10^\circ$) y para consumos inferiores en invierno ($\beta = |\Phi|$). El ángulo de inclinación respecto a horizontal del módulo solar no debe ser inferior a 15° García (1999).
- Ángulo de orientación es aceptable orientarlos 20° hacia el este o el oeste esto debido a que se presenten sombras por árboles que no se puedan erradicar.
- Factor de irradiación

$$FI = 1 - [1.2 \times 10^{-4}(\beta - \beta_{\text{opt}})^2 + 3.5 \times 10^{-5}\alpha^2], \text{ para } 15^\circ < \beta < 90^\circ$$

$$FI = 1 - [1.2 \times 10^{-4}(\beta_r - \beta_{opt})^2] , \text{ para } \beta_r \leq 15^\circ$$

- Factor de sombreado

Las pérdidas por sombreado es un porcentaje que se estimó para el lugar del proyecto y el máximo permisible es el 10%.

$$FS = \frac{100 - \text{Pérdidas por sombreado (\%)}}{100}$$

- Radiación solar diaria sobre plano orientado

$$G_{dm}(\alpha_r, \beta_r) = G_{dm}(0) \cdot K \cdot FI \cdot FS$$

- Potencia mínima del generador
- Performance ratio rendimiento:

Sistema: con inversor PR=0.7, con inversor y batería PR=0.6, directo PR=1.0

- Irradiancia solar en CEM: $G_{CEM} = 1.0 \text{ kW/m}^2$

$$P_{mp,min} = \frac{E_d * G_{CEM}}{G_{dm}(\alpha_r, \beta_r) * PR}$$

- Potencia máxima del generador

La $P_{mp,min}$ del panel se incrementó hasta un 20% como margen de seguridad:

$$P_{mp,máx.} = (1.2) P_{mp,min}$$

- Tensión de trabajo

Potencia<400 Wp: 12 V - 400<**Potencia**<5000 Wp: 12-24 V- **Potencia**>5000: 48-96 V

6.7.2 Dimensionado del sistema fotovoltaico

6.7.2.1 Paneles fotovoltaicos

En el mercado existen gran variedad de paneles, se escogieron paneles policristalinos debido la potencia nominal (P_{mp}), tensión nominal (T_{mp}), eficiencia y precio en el mercado que estos presentan, esto se pudo verificar en la ficha técnica del panel. Para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico solar autónomo se utilizaron las siguientes ecuaciones:

- Número de módulos totales necesarios (mínimo): $Nm_{min} = \frac{P_{mp,min}}{P_{mp}}$
- Potencia total a instalar (mínima): $Pt_{min} = P_{mp} * Nm_{min}$
- Número de módulos totales necesarios (máximo): $Nm_{máx} = \frac{P_{mp,máx}}{P_{mp}}$
- Potencia total a instalar (máxima): $Pt_{máx} = P_{mp} * Nm_{máx}$
- Número de módulos en serie: $Nm_{serie} = \frac{\text{Tensión de trabajo}}{T_{mp}}$

- Número de módulos en paralelo: $N_{m_{paralelo}} = \frac{N_{m_{máx}}}{N_{m_{serie}}}$
- Potencia por rama: Potencia por rama = $N_{m_{serie}} * P_{mp}$
- Tensión por rama: Tensión por rama = $N_{m_{serie}} * T_{mp}$
- Intensidad de cortocircuito del panel I_{CC} (gen,CEM): $I_{CC}(\text{gen,CEM}) = N_{m_{paralelo}} * I_{CC}$

6.7.2.2 Batería

Se calcularon cuantas baterías requiere el sistema solar fotovoltaico teniendo en cuenta el consumo diario de la carga (L_D), días de autonomía del sistema (A), profundidad de descarga máxima ($PD_{máx}$). Además se tuvo a consideración que entre menor sea la profundidad de descarga la batería tendrá una mayor vida útil.

- Consumo medio diario de la carga: $L_D = \frac{1000 * E_d}{\text{Tensión de trabajo}}$
- Eficiencia del inversor: η_{inv} (catálogo)
- Eficiencia del controlador-batería: η_{rb} (catálogo)
- Capacidad nominal de la batería en C_{20} : $C_{20} = \frac{A * L_D}{PD_{máx} * \eta_{inv} * \eta_{rb}}$

Se recomendó seleccionar baterías con malla de fibra de vidrio absorbente (AGM: Absorbent Glass Mat, debido a que soportan bien los picos de arranque de las bombas sin que ello afecte la vida útil de la batería ofreciendo una mayor seguridad para la bomba que sea instalada.

6.7.2.3 Controlador de carga

Se calculó el controlador de carga a instalar teniendo información de tensión nominal, corriente máxima, polaridad de terminales, conexiones, marca y número de serie del controlador datos que son suministrados por el fabricante. Se recomendó escoger un controlador MPPT, ya que este maximiza el voltaje suministrado por los paneles hasta las baterías, generando una acumulación óptima en las baterías.

Intensidad máxima a soportar por controlador en la línea de generador (entrada):

$$I_{REG \text{ Generador}} = 1.25 I_{CC \text{ CEM}}$$

Intensidad máxima a soportar por controlador en la línea de consumo (salida):

$$I_{REG \text{ Generador}} = 1.25 I_{Máx \text{ Carga}}$$

Seleccionar el controlador con la intensidad máxima resultante.

6.7.2.4 Inversor

Se recomendó seleccionar inversores tipo onda senoidal pura, debido a que estos generan una onda de corriente similar a la que entregada por el suministro de energía eléctrica, el inversor de corriente pasa de 12V (DC) a 220V (AC). Se calculó el inversor teniendo en cuenta la potencia nominal de la bomba centrífuga, tensión nominal de entrada, tensión nominal de salida, frecuencia de operación y su eficiencia. Con la potencia se escogió el inversor adecuado para las cargas en corriente alterna que se conectaran.

$$\text{Potencia Inversor} = \frac{\text{Potencia cargas AC}}{\eta_{\text{inv}}}$$

6.7.2.5 Cableado

El cableado es importante en el dimensionamiento de la instalación fotovoltaica para transportar la energía producida, por tal motivo se utilizaron los calibres apropiados para evitar la pérdida de energía y sobrecalentamiento. En las conexiones de los componentes se presentan un porcentaje de pérdidas por ejemplo entre el panel y controlador 3%, controlador y batería 1%, batería e inversor 1%, panel e inversor 3%, e inversor y cargas 3%.

Para el cableado se calculó la intensidad para cada componente del sistema ($I = P/V$) y la sección del cable (S), además se tuvo en cuenta la longitud del cable (L), diferencia de tensión de trabajo entre equipos (V_{1-2}), la conductividad del cable de cobre ($k=56 \text{ m}/[\Omega \cdot \text{mm}^2]$) y el calibre del cable conductor según la AWG (ver Anexo 3) (Eliseo, 2013).

$$S = 2 * \frac{L * I}{k * V_{1-2}} \text{ (Sección del cable)}$$

6.7.2.6 Soporte para paneles

Los paneles solares tendrán soportes fijos debido a que son más económicos respecto a los de seguimiento solar; esta estructura metálica fija varia su forma y clasificación dependiendo del lugar de ubicación si es en el suelo o sobre cubiertas.

6.8 Diseño del sistema de bombeo mediante Bomba ROCHFER

6.8.1 Parámetros de diseño

Del plano topográfico y del perfil del terreno se determinaron la cota de succión (válvula de succión), cota del eje de bomba, cota en la descarga, longitud de la tubería principal de succión y longitud de la tubería principal de impulsión, ver Ilustración 23.

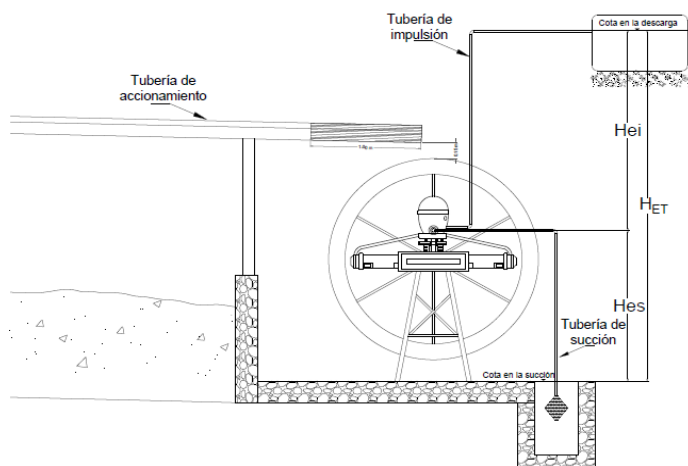


Ilustración 23. Bombeo hidráulico mediante bomba ROCHFER.

Fuente: Propia (2017).

- Calcular la altura estática total

$$H_{ET} = \text{Cota en la descarga} - \text{Cota mínima de succión}$$

- Parámetros de succión

Velocidad de succión (V_s) recomendada entre 1 y 1.5 m/s

$$\text{Calculó del diámetro de succión: } d_s = \frac{4 \cdot Q_b}{\pi \cdot V_s}$$

Chequeo de la velocidad de succión con el diámetro interno comercial de la tubería: $V_s = \frac{4 \cdot Q_b}{\pi \cdot d_s}$

Se calcularon las pérdidas por accesorios y tubería de succión utilizando la ecuación de Hazen-Williams, con longitud equivalente para cada accesorio.

$$h_{fs} = \frac{10,675 \cdot L \cdot Q^{1,85}}{C^{1,85} \cdot d^{4,87}}$$

- Pérdidas por accesorios y tubería de succión

$$CDTs = H_{es} + h_{fs}$$

- Parámetros de impulsión

Velocidad de impulsión (V_i) recomendada entre 1.5 y 2.0 m/s

Por regla general el diámetro de impulsión es un diámetro menor al de succión.

$$\text{Chequeo de la velocidad de impulsión con el diámetro interno de la tubería: } V_i = \frac{4 \cdot Q_b}{\pi \cdot d_i}$$

- Pérdidas por accesorios y en la tubería de impulsión

Se calcularon las pérdidas por accesorios y tubería de impulsión utilizando la ecuación de Hazen-Williams, con longitud equivalente para cada accesorio.

- Carga dinámica total: $CDT = H_{ET} + h_{fs} + h_{fi}$

6.8.2 Selección bomba ROCHFER

Para la selección de la(s) bomba(s) hidráulicas ROCHFER, se analizaron todas las curvas características que se encuentran en el catálogo y se seleccionó la que mejor se ajustó a los requerimientos de volumen y altura dinámica total del proyecto.

6.8.3 Punto real de operación del sistema (PRO)

Se determinaron los accesorios en la tubería de succión e impulsión para la elaboración de la curva del sistema mediante la siguiente ecuación:

$$HD = H_{ET} + QK^{1,85}, \text{ donde:}$$

H_{ET} = altura estática total, Q = caudal, $K^{1,85}$ = pérdidas en la línea de succión e impulsión (longitud equivalente).

6.8.4 Estructura hidráulica de captación

El diseño de la captación consta de una bocatoma con rejilla de fondo para captar el caudal de accionamiento para la rueda hidráulica ROCHFER, se realizó con la misma metodología de López (1995) descrita anteriormente en el capítulo 6.5, exceptuando el diseño del desarenador, que para este caso no se requiere.

6.8.5 Conducción bocatoma-rueda ROCHFER

Se debe utilizar tubería PVC para derivar el caudal que va accionar la rueda hidráulica; este cálculo se realizó siguiendo la metodología descrita en el capítulo 6.5.6.

6.8.6 Base de la bomba

Se diseñó una losa en concreto ciclópeo, se especificó el material y la altura de los muros de contención, además de los soportes que se colocaron cada 3 metros en la tubería de accionamiento.

6.8.7 Pozo de succión

El pozo de succión se diseñó siguiendo las recomendaciones de ROCHFER, donde la distancia mínima desde la válvula de pie hasta el fondo del pozo debe ser mayor a 30 cm y desde la succión de la bomba hasta la válvula de pie debe ser mayor a 50 cm.

-Sumergencia: $S \geq 2.5D_s + 0.1$

- Altura de la válvula de aspiración: $H_{vál}$

- Distancia entre la válvula de pie y el fondo del pozo: $H_{vál-pozo}$

-Altura del pozo= $S + H_{vál} + H_{vál-pozo}$

6.8.8 Canal de retorno

El canal se debe encargar de llevar el caudal de exceso al río, el diseño se realizó mediante el software Hcanales V 3.0 ingresando las condiciones de flujo como caudal, tirante en la salida del canal, ancho de solera en la entrada y salida, y diferencias de nivel.

6.9 Evaluación técnica-económica

Para la evaluación del proyecto se determinaron cinco elementos sugeridos por la FAO (2005) y que se describen a continuación:

6.9.1 Estimación de ingresos

El ingreso que va a tener el inversionista será la venta del zapallo a los centros de acopio; el precio pagado al productor, el rendimiento y los costos de producción se extrajeron de la base de datos de la guía de costos agrícolas de la página web de la gobernación del Valle del Cauca. El ciclo vegetativo del zapallo es aproximadamente de 4 meses, realizándose 3 cosechas al año.

El zapallo es un producto perecedero que contiene gran cantidad de vitaminas, muy utilizado para realizar preparaciones diarias de cocina como sopas, tortas y jugos y, además, en la agroindustria para la obtención de harinas, mermeladas, compotas y concentrados para animales.

La utilidad (ingresos netos) del agricultor por cosecha será la diferencia entre el ingreso bruto y los costos de producción, y la utilidad anual será la multiplicación de la utilidad por el número de cosechas realizadas al año.

6.9.2 Evaluación de la tecnología

Se analizó si la tecnología seleccionada se puede reparar localmente o si requiere de algún repuesto fuera del país, ya que esto implicaría un coste adicional por importación; es necesario tener en cuenta lo anterior para definir los costos de mantenimiento y reemplazos. Se especificó la garantía de los equipos, y lugar de donde provienen los equipos o repuestos, entre otros.

6.9.3 Estimación de inversión y costos

Se determinó la inversión y los costos asociados de operación, instalación y mantenimiento del proyecto.

La **INVERSIÓN** fue la suma de: el precio inicial de los activos (equipos y materiales) en su punto de venta, los impuestos exigidos sobre ese precio, el transporte del activo a su ubicación final, incluyendo seguros, costos indirectos (AIU: administración, imprevistos, utilidad), si la máquina se encuentra en el exterior pago por aranceles de importación, costos de la instalación, capacitación de los operadores, asistencia técnica y requerimientos legales si se necesitan.

Los **COSTOS ANUALES** fueron la suma de: costos de operación (electricidad solo para bombeo eléctrico), costos de mantenimiento y gastos generales si se presentan (salarios extras, salario del vigilante si el lugar lo amerita).

6.9.4 Financiamiento de la inversión

En este punto se definió quién va financiar el proyecto (banco/cooperativa) o si los recursos son propios del inversionista. En caso de ser un banco se tuvo en cuenta la tasa de interés, la cuota mensual o anual y el pago de seguro de vida en caso de muerte del inversionista.

6.9.5 Análisis financiero

6.9.5.1 Flujo de caja libre

El flujo de caja anual se realizó con el fin de determinar si el proyecto sería capaz de producir el dinero suficiente para pagar la totalidad de los costos operativos y del financiamiento. Para ello se calculó la tabla de amortización de la deuda. Luego se estipuló el ingreso bruto de cada año y se restaron todos los costos de caja de ese mismo año y así se obtuvo la utilidad operacional. Posterior a eso se calcularon las depreciaciones

correspondientes a la inversión teniendo en cuenta la vida útil de cada equipo o material utilizado.

Se calcularon los gastos financieros que son los intereses de la deuda, luego la utilidad neta que es la utilidad operacional menos la depreciación y los gastos financieros, la generación de efectivo viene siendo la adición de la utilidad neta más las depreciaciones, y el flujo de caja la adición de la generación de efectivo, el desembolso del crédito, valor del mercado si lo hay menos pago a capital y la inversión. Si el valor restante sigue siendo positivo el proyecto va a producir el dinero suficiente durante ese año para pagar los costos de producción, operativos, y el financiamiento y quedara una suma de ganancia para el inversionista.

Depreciación: Según el decreto 3019 de 1989 del Ministerio de Industria y Comercio en Colombia, la depreciación en bienes de maquinaria y equipos tienen una vida útil de 10 años y en inmuebles de 20 años; teniendo en cuenta lo anterior la depreciación se calculó así:

- Depreciación línea recta = $\frac{\text{valor activo}}{\text{vida fiscal del activo}}$
- Depreciación acelerada = $\frac{\text{vida útil restante}}{\text{suma de dígitos}} * \text{valor activo} - \text{Suma de dígitos} = \frac{V(V+1)}{2}$

6.9.5.2 Rentabilidad financiera

Los tres sistemas de bombeo propuestos fueron evaluados desde el punto de vista técnico-económico, determinando la alternativa viable económicamente con los indicadores de rentabilidad de valor presente neto (VPN) y tasa interna de retorno (TIR). Además se realizó un análisis de sensibilidad del proyecto.

Las alternativas de inversión que se plantearon para el proyecto fue que tenían igual servicio, pero diferente vida de servicio debido a que los paneles solares tienen vida útil de 30 años, y los equipos utilizados 10 años. El criterio decisorio es la alternativa mutuamente excluyente, cuando se aprobó una alternativa las otras quedaron rechazadas.

- a) Valor Presente Neto (VPN): Se calculó la diferencia entre el valor actual de los ingresos y todos los costos que implicó realizar el proyecto. Si el VPN era mayor a cero el proyecto es rentable, si seguía siendo igual a cero iba producir el dinero suficiente para suplir los costos anuales pero no habría ganancia, si era menor a cero el proyecto no era factible.
- b) Tasa Interna de Retorno (TIR): Se calculó la rentabilidad del proyecto en porcentaje por el tiempo estimado de duración, sobre el monto de la inversión no amortizada.
- c) Análisis de sensibilidad: Se realizó con el fin de indicar cómo los resultados que se obtuvieron cambian con pequeñas variaciones en las condiciones iniciales, como por ejemplo el rendimiento del zapallo y el área cultivable.

7 RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.1 Información secundaria

7.1.1 Información topográfica

Después de la recopilación de datos topográficos, se obtuvo el perfil del terreno desde la orilla del río hasta el tanque de almacenamiento. Por otro lado, el grupo REGAR suministró un plano topográfico (ver Anexo 10) donde se presentan: la cota del terreno (orilla del río Guabas) de 1640 m.s.n.m y la cota en la descarga (tanque de almacenamiento) de 1810 m.s.n.m y las curvas de nivel del área de influencia del sistema de riego existente; a este plano se le incorporó la ubicación de los sistemas de bombeo eléctrico, solar e hidráulico.

7.1.2 Información del sistema de riego por goteo

El grupo REGAR suministró toda la información del sistema de riego, como es la distribución y el número de los módulos de riego, el caudal por modulo, el volumen de riego, la longitud de cinta de goteo y las áreas de influencia del sistema de riego, como se observa en la Ilustración 24 y en la tabla 6, teniendo como volumen total del proyecto 9180 litros.

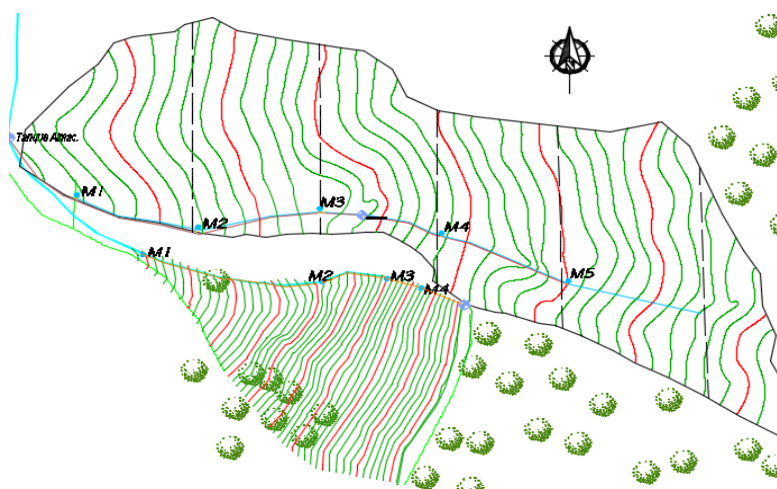


Ilustración 24. Distribución de los módulos de riego.

Fuente: REGAR (2014).

Tabla 6. Caudal y volumen de riego del primer y segundo diseño.

Módulo	DISEÑO #1				Módulo	DISEÑO #2			
	Caudal (lps)	Volumen de Riego (L)	Long. Cinta (m)	Área (Ha)		Caudal (lps)	Volumen de Riego (L)	Long. Cinta (m)	Área (Ha)
No 1	0.61	1274.20	553	0.11	No 1	0.43	907.84	394	0.08
No 2	0.56	1172.82	509	0.10	No 2	0.41	861.76	374	0.07
No 3	0.46	956.23	415	0.08	No 3	0.37	783.42	340	0.07
No 4	0.53	1106.00	480	0.10	No 4	0.52	1082.96	470	0.09
No 5	0.49	1034.57	449	0.09	Total	1.73	3635.98	1578	0.32
Total	2.64	5543.83	2406	0.48	Volumen total del proyecto 9180 Litros				

Fuente: Propia (2017).

7.2 Caudal de oferta

El recurso hídrico que abastecerá el cultivo del zapallo proviene del río Guabas, en el cual se determinó el caudal de oferta mediante un aforo por vadeo realizado en el mes de octubre de 2016. Los datos obtenidos del aforo del río Guabas se encuentran en la Tabla 7.

Tabla 7. Verticales en la sección transversal en el punto de captación del río Guabas.

Vertical	Ancho (m)	Profundidad (m)	Vertical	Ancho (m)	Profundidad (m)
0	0.0	0.00	8	0.5	0.48
1	0.2	0.07	9	0.5	0.38
2	0.5	0.09	10	0.5	0.23
3	0.5	0.11	11	0.5	0.19
4	0.5	0.27	12	0.5	0.09
5	0.5	0.35	13	0.5	0.04
6	0.5	0.50	14	0.2	0.00
7	0.5	0.57			

Fuente: Propia (2017).

Con la información anterior se realizó el perfil del río Guabas en el punto de bombeo, como se observa en la Ilustración 25.

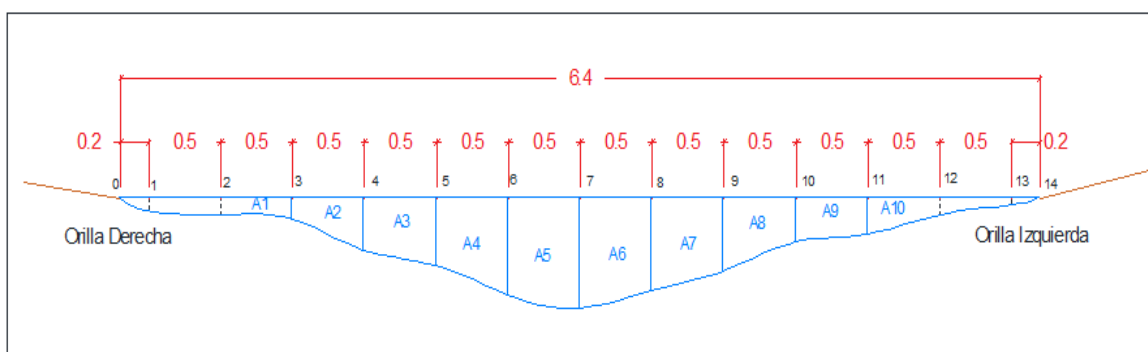


Ilustración 25. Sección transversal en el punto de la captación del río Guabas.

Fuente. Propia (2016).

En el Anexo 4 se presenta la información registrada durante el aforo y el cálculo de las velocidades en la sección del río Guabas tomado con el molinete 2030 estándar. En la tabla 8 se presenta el cálculo del caudal en el río Guabas (1.041 m³/s)

Tabla 8. Caudal por sección transversal del río Guabas.

Sección	Velocidad (m/s)	Área (m ²)	Caudal (m ³ /s)
A1	0.216	0.097	0.021
A2	0.435	0.094	0.041
A3	0.555	0.156	0.087
A4	0.549	0.211	0.116
A5	0.756	0.274	0.207
A6	0.878	0.265	0.233

A7	0.707	0.217	0.153
A8	0.711	0.151	0.107
A9	0.532	0.104	0.055
A10	0.193	0.107	0.021
Total	5.532	1.676	1.041

Fuente: Propia (2017).

7.3 Radiación solar

Utilizando los registros de brillo solar mensuales multianuales de la estación Tenerife y calculando los datos faltantes mediante el Método Racional Deductivo, se calculó la irradiación solar mensual multianual mediante el software CROPWAT V8.0, por último se realizó un análisis de excedencia con el método de Weibull y se escogió el 75% de probabilidad, los datos se encuentran en la Tabla 9.

Tabla 9. Datos de brillo solar diario e irradiación en la vereda Betania.

Mes\ Probabilidad	Brillo solar (diario)				Irradiación (kWh/m²/día)			
	40%	50%	60%	75%	40%	50%	60%	75%
ENE	5.35	4.99	4.54	4.12	4.65	4.48	4.31	4.12
FEB	4.79	4.50	4.26	3.78	4.59	4.48	4.37	4.17
MAR	3.93	3.73	3.49	3.21	4.37	4.26	4.17	4.03
ABR	3.20	3.04	2.69	2.53	4.00	3.92	3.78	3.70
MAY	3.37	3.18	3.05	2.86	3.89	3.84	3.78	3.70
JUN	4.06	3.91	3.64	3.40	4.06	4.00	3.89	3.81
JUL	4.49	4.25	4.08	3.68	4.28	4.17	4.12	3.95
AGO	4.57	4.31	3.80	3.63	4.48	4.37	4.14	4.09
SEP	3.96	3.89	3.51	3.20	4.31	4.28	4.12	4.00
OCT	3.48	3.18	3.04	2.61	4.06	3.92	3.86	3.67
NOV	3.48	3.35	2.92	2.57	3.89	3.84	3.67	3.50
DIC	4.35	3.98	3.66	3.18	4.14	4.00	3.86	3.67
MINIMOS	3.20	3.04	2.69	2.53	3.89	3.84	3.67	3.50

Fuente: IDEAM (2016).

7.4 Escenarios de operación

Se analizaron como escenarios de trabajo un volumen de riego con uno, dos y tres días de autonomía del sistema de bombeo asociados a horas de bombeo, arrojando diferentes caudales como se observa en la Tabla 10.

Tabla 10. Caudales de bombeo asociados a días de autonomía del sistema de bombeo.

Volumen (l)	Días de autonomía	Volumen total (l)	Horas de bombeo									
			0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	
			Caudal de bombeo (lps)									
9180	1	9180	5.1	2.55	1.27	0.85	0.64	0.51	0.42	0.36	0.32	
9180	2	18360	10.2	5.1	2.55	1.7	1.27	1.02	0.85	0.73	0.64	
9180	3	27539	15.3	7.65	3.82	2.55	1.91	1.53	1.27	1.09	0.96	

Fuente: Propia (2017).

Se escogió un caudal de 5.1 lps debido a que las bombas centrífugas eléctricas trabajan a eficiencias entre el 50 y 70% y, además, se pretende que el sistema de bombeo tenga como mínimo dos días de autonomía ante una posible avería en el sistema que ocasione el parado de la máquina y se realice el abastecimiento del riego con normalidad mientras se realiza el mantenimiento.

Se descartan los caudales de 15.3, 10.2 y 7.65 lps debido a que estos requieren una bomba más grande al caso anterior, un tanque de almacenamiento de mayor capacidad y habrá mayor requerimiento energético.

Se descartaron los caudales menores a 3.82 lps debido a que las bombas centrífugas eléctricas a gran altura dinámica y caudales pequeños (<4.0 lps) trabajan a eficiencias muy bajas; por ende, habrá un mayor consumo de energía eléctrica; esto se comprobó revisando varios catálogos de bombas centrífugas en el mercado.

En la Tabla 11 se encuentra el cálculo del diámetro de las tuberías de succión e impulsión asociado al caudal de bombeo, para la selección del diámetro comercial disponible.

Tabla 11. *Cálculo del diámetro en las tuberías de succión e impulsión.*

Parámetro	Resultado	Unidad
Velocidad de succión estimada	1.25	m/s
Caudal de diseño	0.0051	m ³ /s
Diámetro de succión	3	in
Velocidad de impulsión estimada	1.5	m/s
Diámetro de impulsión	2.5	in

Fuente: Propia (2017).

La velocidad de succión resulto de 1.12 m/s y la velocidad de impulsión de 1.61 m/s, ambas velocidades dentro del rango permitido, menor y mayor que 1.5 m/s respectivamente.

En la Tabla 12 se presentan los diámetros internos de tubería seleccionados del catálogo de PAVCO. En la selección de la tubería se escogió RDE 21 y 13.5 debido a que cumplen con la velocidad mínima permitida. Por otro lado, la tubería en la línea de impulsión de PVC RDE 21 no soporta la presión total requerida por el sistema; por ende, se optó por un tramo de tubería RDE 13.5 de 3" que soporta 220 mca. No se escoge tubería RDE 13.5 de diámetro 2 1/2" debido a que no es comercial.

Tabla 12. *Parámetros de diseño en tubería PVC.*

RDE	Presión (mca)	Diámetro nominal (in)	Diámetro interno (mm)	Vel (m/s)
13.5	220	3	75.74	1.13
21	140	2.5	66.06	1.49
21	140	3	80.42	1.00
26	112	3	82.04	0.96
32.5	87.5	3	83.42	0.93

Fuente: PAVCO (nd.).

7.5 Bocatoma con rejilla de fondo

7.5.1 Azud

Para tener un margen de seguridad en el caudal de diseño, se incrementó entre un 10 y un 15% el caudal de bombeo:

Caudal de diseño= caudal de bombeo x 1.12= 5.1lps x 1.12 → **Q_d= 5.7 lps**

En la Tabla 13 se observan las condiciones del diseño del azud para la bocatoma de fondo.

Tabla 13. Condiciones de diseño en el azud.

Parámetro	Símbolo	Resultado	Unidad
Ancho del azud	L	0.7	m
Caudal de diseño	Q _d	0.0057	m ³ /s
Profundidad de la lámina agua sobre el azud	H	0.027	m
Ancho del azud corregido	L'	0.695	m
Velocidad del agua sobre el azud	V _r	0.304	m/s (cumple velocidad)

Fuente: Propia (2017).

7.5.2 Rejilla y canal de aducción

En la Tabla 14 se encuentran los resultados del cálculo de la rejilla y el canal de aducción. Se seleccionó un diámetro de barrotes de 0.0127 m (½") y separación entre ellos de 0.04 m, y se asumió una velocidad entre barrotes (V_b) de 0.1 m/s

Tabla 14. Resultados en el diseño de la rejilla y el canal de aducción.

Parámetro	Símbolo	Resultado	Unidad	Recomendación	
Alcance filo superior	X _s	0.239	m		
Alcance filo inferior	X _i	0.14	m		
Ancho del canal de aducción	B	0.339	m	≈	0.4 m
Separación entre barrotes (2-6 cm)	a	0.04	m		
Ancho de los barrotes	b	0.0127	m	≈	0.5 in
Velocidad entre los barrotes	V _b	0.1	m/s		
Área neta	An	0.063	m ²		
Longitud rejilla	L _r	0.209	m	Se adopta una rejilla de 50 cm para una fácil limpieza	
Área neta	An	0.152	m ²		
Numero de orificios	N	9.488	orificios	≈	10 orificios
Área neta final	An	0.16	m ²		
Velocidad entre los barrotes final	V _b	0.04	m/s		
Longitud rejilla final	L_r	0.527	m	≈	0.55 m

Fuente: Propia (2017).

Suponiendo que el río en creciente tiene una capacidad máxima de arrastrar piedras hasta de 0.5 m de diámetro, entonces:

Tener en cuenta el empuje del agua debido a que la piedra va a estar sumergida:

$$\gamma_{\text{piedra}}' = \gamma_{\text{piedra}} - \gamma_{\text{agua}} = 2.6 - 1.0 \text{ t/m}^3 = 1.6 \text{ t/m}^3 ; W = \gamma_{\text{piedra}}' \cdot V$$

El momento máximo se genera cuando la piedra se encuentra en la mitad de la reja y se apoya en dos barrotes, entonces se tiene que el momento flector y resistente es el siguiente:

$$M_{\text{flector}} = \frac{\left(\frac{W}{2}\right) \cdot L}{8}; M_{\text{resistente}} = \frac{f_s \cdot e^2 \cdot t}{6}$$

$$f_s = 0.6 f_y, f_y = \text{Esfuerzo de fluencia} = 2530 \text{ kg/cm}^2; M_{\text{resistente}} = M_{\text{flector}}$$

En la Tabla 15 se presenta el momento flector y el espesor del barrote para el diámetro de piedra estimado.

Tabla 15. Cálculo del momento flector y espesor del barrote.

d (m)	V (m ³)	γ' piedra (ton/m ³)	W (ton)	Momento flector (ton-m)	Momento flector (kg-cm)	e (in)	e comercial (in)
0.4	0.0335	1.6	0.0536	0.0008	83.7758	0.2321	1/2"
0.5	0.0654	1.6	0.1047	0.0016	163.6246	0.3244	1/2"
0.6	0.1131	1.6	0.181	0.0028	282.7433	0.4265	1/2"
0.7	0.1796	1.6	0.2874	0.0045	448.986	0.5374	1/2"

Fuente: Propia (2017).

El barrote de 1/2" soportará piedras de diámetro máximo de 0.7 m.

En la Tabla 16 se encuentran los niveles de agua al inicio y al final del canal de aducción.

Tabla 16. Condiciones en el canal de aducción.

Parámetro	Símbolo	Resultado	Unidad
Profundidad aguas abajo	he	0.027	m
Longitud de canal de aducción	Lc	0.70	m
Pendiente del fondo del canal	i	0.03	
Prof. aguas arriba	ho	0.03	m
Altura al inicio del canal	Ho	0.18	m
Altura al final del canal	He	0.20	m
Velocidad al final del canal	Ve	0.519	m/s (cumple velocidad > 0.3 m/s)

Fuente: Propia (2017).

Cotas en el canal de aducción:

Fondo aguas arriba: 1640- 0.18= 1639.82 msnm

Fondo aguas abajo: $1640 - 0.20 = 1639.80$ msnm

Lámina aguas arriba: $1639.82 + 0.030 = 1639.85$ msnm

Lámina aguas abajo: $1639.80 + 0.027 = 1639.827$ msnm

7.5.3 Cámara de recolección

Para las condiciones en la cámara de recolección se dejó un borde libre de 0.33 m, quedando la altura final del muro en 1.2 m, ver Tabla 17.

Tabla 17. *Condiciones en la cámara de recolección.*

Parámetro	Símbolo	Resultado	Unidad
Alcance filo superior	Xs	0.309	m
Alcance filo inferior	Xi	0.174	m
Ancho de la cámara de recolección	B _{cámara}	0.609	m
Ancho de la cámara de recolección final	B_{cámara}	1	m
Caudal máximo del río	Q_{max}	1.041	m³/s
Altura máxima del caudal máximo del río	H _{max}	0.868	m
Altura máxima de muro	H	1.2	m

Fuente: Propia (2017).

Cota en la cámara de recolección:

Cresta del vertedero de excesos: $1639.80 - B.L = 1639.80 - 0.15 = 1639.65$ m.s.n.m

7.5.4 Caudal de excesos

Caudal promedio del río: 0.104 m³/s.

En la Tabla 18 se encuentran las condiciones de chorro superior e inferior en la cámara de recolección, además del ancho de evacuación de excesos.

Tabla 18. *Condiciones para el caudal de excesos.*

Parámetro	Símbolo	Resultado	Unidad
Caudal promedio del río	Q_{pr}	0.104	m³/s
Altura de carga sobre el azud medio	Hm	0.187	m
Caudal captado	Qcap	0.092	m ³ /s
Caudal de excesos	Qexc	0.086	m ³ /s
Altura de excesos	Hexc	0.13	m
Velocidad de excesos	Vexc	0.442	m/s
Alcance del chorro superior	Xs	0.396	m
Alcance del chorro inferior	Xi	0.273	m
Ancho de la evacuación de excesos	S	0.496	m

Fuente: Propia (2017).

Vertedero de excesos

Altura del vertedero de excesos de 15 cm y distancia entre el vertedero de excesos y la cámara de recolección 55 cm.

7.5.5 Tubería de excesos

Suponiendo una cota de descarga de 1639.10 se procede a determinar la tubería de excesos:

- Pendiente de la tubería: $i = \frac{(1639.5-1639.1)}{15} \times 100 \rightarrow S = 2.67 \% \rightarrow J = 0.0267 \text{ m/m}$

- Diámetro interno tubería: $D = \left(\frac{Q_{exc}}{0.2785 \cdot C \cdot J^{0.54}} \right)^{\frac{1}{2.63}} \rightarrow D = \left(\frac{0.086}{0.2785 \cdot 150 \cdot 0.0267^{0.54}} \right)^{\frac{1}{2.63}}$

$D = 0.20 \text{ m} \approx 8''$ Tubería de PVC RDE 51 de 8'' diámetro interior de 210.49 mm.

7.5.6 Conducción bocatoma-desarenador

Se desea llevar el caudal captado a un desarenador que estará ubicado a 10 m de la bocatoma.

- Pendiente de la tubería: $S = \frac{(1639.5-1639.3)}{10} \times 100 \rightarrow S = 2.00 \%$

- Diámetro interno tubería: $D = 1.548 \left(\frac{nQ}{S^{1/2}} \right)^{3/8} \rightarrow D = 1.548 \left(\frac{0.0057 \cdot 0.01}{0.02^{1/2}} \right)^{3/8} \rightarrow D = 0.08 \approx 4''$

Asumiendo una tubería de PVC RDE 51 de 4'' diámetro interior (109.82 mm) se calcularon las condiciones de flujo a tubo lleno.

En la Tabla 19 se encuentran los resultados de la conducción de la bocatoma al desarenador.

Tabla 19. *Parámetros en la tubería de conducción (bocatoma hasta el desarenador).*

Parámetro	Símbolo	Resultado	Unidad
Caudal diseño	Qd	0.0057	m³/s
Coeficiente de manning para tubería PVC	n	0.01	
Longitud de conducción	L	10	m
Pendiente de la tubería	S	2	%
Diámetro interno tubería	D	0.08	m
Caudal en la tubería llena	Q _{lleno}	0.011	m³/s
Velocidad en la tubería llena	V _{lleno}	1.27	m/s (cumple, vel > 0.6 m/s)
Relación entre Q _{diseño} y Q _{lleno}	Qd/Qll	0.5	
Relación entre velocidades	Vr/Vll	0.85	
Relación entre diámetros	d/D	0.56	
Velocidad	Vr	1.08	m/s
Diámetro de la tubería	d	0.06	m
Verificación de la cota a la salida de la bocatoma	cota	0.15	m
Caudal de exceso máx. previsto	Q _{exceso}	0.0058	m³/s

Fuente: Propia (2017).

7.5.7 Desarenador

Las condiciones de diseño en el desarenador será para un diámetro de partículas de hasta 0.05 mm, grado de remoción del 75% y grado del desarenador $n=1$ (deflectores deficientes o sin ellos). Se decide una profundidad de 1.5 m en el desarenador y se calcula el tiempo en que tarda en llegar una partícula de diámetro 0.05 mm al fondo. Se adoptó una relación de L/B de 16:1 debido a que con esta relación se cumple la velocidad requerida en el vertedero de salida >0.3 m/s. En la Tabla 20 se encuentran las condiciones de diseño en el desarenador.

Tabla 20. Condiciones en el desarenador.

Parámetro	Símbolo	Resultado	Unidad
Caudal en la tubería llena	Q_{lleno}	0.011	m³/s
Velocidad en la tubería llena	V_{lleno}	1.268	m/s
Diámetro	d	0.06	m
Diámetro de la partícula a sedimentar	d	0.05	mm
Grado del desarenador	n	1	
Porcentaje de remoción de partículas		80%	
Peso específico del material	γ	2.65	
Temperatura del agua	T	18	°C
Viscosidad	u	0.01059	cm ² /s
Velocidad de sedimentación	V_s	0.212	cm/s
Relación Largo / Ancho	L/B	16:01	
Número de Hazen	Θ/t	4	m
Altura del desarenador (profundidad)	H	1.5	m
Tiempo en que la partícula llega al fondo	t	706.59	s
Período de retención hidráulicos (0.5-4h)	Θ	2119.77	s
Volumen del tanque	V	12.08	m ³
Área superficial del tanque	A_s	8.06	m ²
Ancho	B	0.71	m
Largo	L	11.35	m
Carga hidráulica superficial (15-80m ³ /m ² .d)	q	0.00071	m ³ /m ² .s
Velocidad de sedimentación teórica $V_o=q$	V_o	0.071	cm/s
Diámetro teórico	d_o	0.0029	cm
$\Theta/t= V_s/V_o$	V_s/V_o	3	
Velocidad horizontal	V_h	0.54	cm/s
Velocidad horizontal máxima	$V_h \text{ máx.}$	10.71	cm/s
Velocidad resuspensión máxima	$V_r \text{ máx.}$	9.29	cm/s

Fuente: Propia (2017).

Cálculo de los elementos del desarenador

Vertedero de salida

- Carga en el vertedero de salida: $H_v = \left(\frac{Q_d}{1.84 \times B}\right)^{2/3} \rightarrow H_v = \left(\frac{0.0057}{1.84 \times 0.71}\right)^{2/3} \rightarrow H_v = 0.027 \text{ m}$

- Velocidad en el vertedero de salida: $V_v = \frac{Q}{H_v \times B} \rightarrow V_v = \frac{0.0057}{0.027 \times 0.71} \rightarrow V_v = 0.301 \text{ m/s}$

- Alcance filo superior: $X_s = 0.36V_v^{\frac{2}{3}} + 0.6H_v^{\frac{4}{7}} \rightarrow X_s = 0.36(0.301)^{\frac{2}{3}} + 0.6(0.027)^{\frac{4}{7}}$

$\rightarrow X_s = 0.237 \text{ m}$

En la Tabla 21 se encuentran las condiciones al inicio y salida en el desarenador, además del dimensionamiento de la cámara de aquietamiento y la zona de lodos.

Tabla 21. Condiciones en el vertedero de salida y cámara de aquietamiento.

Pantalla de salida			
Profundidad	H/2	0.75	m
Distancia al vertedero de salida	15 H _v	0.4	m
Pantalla de entrada			
Profundidad	H/2	0.75	m
Distancia a la cámara de aquietamiento	L/4	2.84	m
Almacenamiento de lodos			
Profundidad máxima (propuesta)		0.2	m
Distancia punto de salida a la cámara de aquietamiento	L/3	3.78	m
Distancia punto de salida al vertedero salida	(2 L)/3	7.57	m
Pendiente transversal	0.2/B	28.2	%
Pendiente longitudinal (en L/3)	0.2/(L/3)	5.3	%
Pendiente longitudinal (en 2L/3)	0.2/(2L/3)	2.6	%
Cámara de aquietamiento			
Profundidad	H/3	0.5	m
Ancho	B/3	0.24	m
Largo (adoptado)		1	m

Fuente: Propia (2017).

Rebose de la cámara de aquietamiento

- Caudal de exceso: $Q_{exc} = Q_{lleno} - Q_{diseño} \rightarrow Q_{exc} = 0.011 - 0.0057 = 5.8 \text{ lps}$

- Altura de exceso: $H_{exc} = \left(\frac{Q_{exc}}{1.84 \times L_e}\right)^{2/3} \rightarrow H_{exc} = \left(\frac{0.0058}{1.84(1.0)}\right)^{2/3} \rightarrow H_{exc} = 0.021 \text{ m}$

- Velocidad de excesos: $V_{exc} = \frac{Q_{exc}}{H_{exc} \times L_e} \rightarrow V_{exc} = \frac{0.0058}{0.021 \times 1} \rightarrow V_{exc} = 0.269 \text{ m/s}$

- Alcance filo superior: $X_s = 0.36V_{exc}^{\frac{2}{3}} + 0.6H_{exc}^{\frac{4}{7}} \rightarrow X_s = 0.36(0.269)^{\frac{2}{3}} + 0.6(0.021)^{\frac{4}{7}}$
 $\rightarrow X_s = 0.217 \text{ m}$

- Perfil hidráulico

$V_1 = 1.078 \text{ m/s}, V_2 = \frac{0.0057}{0.24 \times 0.5} \rightarrow V_2 = 0.048 \text{ m/s}$

$$h_m = k \frac{\Delta V^2}{2g} \rightarrow h_m = 0.1 \left(\frac{(1.078^2) - (0.048^2)}{2 \times 9.81} \right) \rightarrow h_m = 0.006 \text{ m}$$

Pérdidas a la entrada de la zona de sedimentación:

$$V_1 = 0.048 \text{ m/s}, V_2 = V_h \rightarrow V_h = 0.0054 \text{ m/s}$$

$$h_m = k \frac{\Delta V^2}{2g} \rightarrow h_m = 0.1 \left(\frac{(0.048^2) - (0.0054^2)}{2 \times 9.81} \right) \rightarrow h_m = 0.000 \text{ m}$$

- Tubería de excesos

- Pendiente de la tubería: $i = 2\% \rightarrow J = 0.020 \text{ m/m}$

$$\text{- Diámetro interno tubería: } D = \left(\frac{Q_{exc}}{0.2785 \cdot C \cdot J^{0.54}} \right)^{\frac{1}{2.63}} \rightarrow D = \left(\frac{0.0058}{0.2785 \cdot 150 \cdot 0.020^{0.54}} \right)^{\frac{1}{2.63}}$$

$D = 0.0761 \text{ m} \approx 3''$ Tubería de PVC RDE 51 de 3'' diámetro interior de 85.41 mm.

- Tubería de lavado

Cota de entrega del desagüe de lavado = 1637.05 (supuesto)

Cota de lámina de agua sobre la tubería = 1638.75

Suponiendo el diámetro de la tubería de excesos: $D = 3'' = 0.152 \text{ m}$

Longitud de la conducción = 40 m

Altura disponible = $98.75 - 97.05 = 1.70 \text{ m}$

$$J = H/L = 1.70/40 = 0.0425 \text{ m/m}$$

- Las pérdidas en la conducción se determinan mediante longitud equivalente de cada accesorio utilizado (diámetro 3''): Entrada normal: 1.1 m, Válvula compuerta: 0.5 m, Codo 90° radio corto: 2.5 m, Te cambio dirección: 5.2 m, Tubería PVC: 40 m, *LE. Total: 49.3 m.*

$$J = H/L.E = 1.7/49.3 = 0.034 \text{ m/m}$$

Caudal inicial:

$$Q_{inicial} = 0.2785 \cdot C \cdot D^{2.63} \cdot J^{0.54} \rightarrow Q_{inicial} = 0.2785 \cdot 150 \cdot 0.08342^{2.63} \cdot 0.034^{0.54}$$

$$\rightarrow Q_{inicial} = 0.010 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Velocidad:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.010 \cdot 4}{\pi \times (0.08342^2)} \rightarrow V = 1.805 \text{ m/s}$$

El tiempo de vaciado se determina a partir de la ecuación de descarga de un orificio.

Coeficiente de descarga:

$$Q = C_d * A_o * \sqrt{2gH} \rightarrow C_d = \frac{Q}{A_o * \sqrt{2gH}} = \frac{0.010}{\pi * 0.08342^2 * \sqrt{2 * 9.81 * 1.70}} \rightarrow C_d = 0.313$$

Tiempo de vaciado:

$$t_{\text{vaciado}} = \frac{2A_s}{A_o * C_d \sqrt{2g}} H^{1/2} = \frac{2 * 8.06 * 4}{\pi * 0.08342^2 * 0.313 * \sqrt{2 * 9.81}} 1.7^{1/2} \rightarrow t_{\text{vaciado}} = 46.27 \text{ min}$$

7.5.8 Conducción del desarenador-pozo de succión

Se desea llevar el caudal desde el desarenador hasta el pozo de succión que estará ubicado a 38.35 m del vertedero de salida del desarenador.

$$\text{- Pendiente de la tubería: } S = \frac{(1638.87 - 1638.37)}{38.35} * 100 \rightarrow S = 1.3 \%$$

$$\text{- Diámetro interno tubería: } D = 1.548 \left(\frac{Q_n}{S^{1/2}} \right)^{3/8} \rightarrow D = 1.548 \left(\frac{0.0057 * 0.01}{0.013^{1/2}} \right)^{3/8} \rightarrow D = 0.09 \approx 4"$$

Seleccionando una tubería de PVC RDE 51 de 4" diámetro interior de 109.82 mm, se calculan las condiciones de flujo a tubo lleno:

$$\text{- Caudal en la tubería: } Q_{\text{lleno}} = 0.312 \frac{D^{8/3} S^{1/2}}{n} = 0.312 \frac{(0.1073^8) * (0.013^2)^{1/2}}{0.01} \rightarrow Q_{\text{lleno}} = 0.009 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\text{- Velocidad en la tubería llena: } V_{\text{lleno}} = \frac{Q_{\text{lleno}}}{A_{\text{lleno}}} \rightarrow V_{\text{lleno}} = \frac{4 * 0.009}{\pi * (0.1073^2)}$$

$$\rightarrow V_{\text{lleno}} = 1.02 \text{ m/s} > 0.6 \text{ m/s cumple la condición.}$$

En la Tabla 22 se encuentran los resultados de la conducción del desarenador al pozo de succión.

Tabla 22. Condiciones entre el desarenador y el pozo de succión.

Parámetro	Símbolo	Resultado	Unidad
Caudal diseño	Qd	0.0057	m³/s
Coeficiente de manning tubería PVC	n	0.01	
Longitud de conducción	L	38.35	m
Pendiente	S	1.304	%
Diámetro interno tubería	D	0.089	m
Caudal en la tubería llena	Q _{lleno}	0.009	m³/s
Velocidad en la tubería llena	V _{lleno}	1.024	m/s
Relación entre Q _{diseño} y Q _{lleno}	Qd/Qll	0.616	
Relación entre velocidades	Vr/Vll	0.908	Anexo 2
Relación entre diámetros	d/D	0.639	Anexo 2
Velocidad	Vr	0.93	m/s
Diámetro	d	0.069	m
Verificación de la cota a la salida del desarenador	cota	0.135	m
Caudal de exceso máx. previsto	Q _{exceso}	0.0036	m³/s

Fuente: Propia (2017).

7.6 Bombeo convencional

7.6.1 Parámetros de diseño

Del plano topográfico y del perfil del terreno se determinaron las siguientes cotas:

- Cota mínima en el pozo de succión: 1638.30 m.s.n.m
- Cota propuesta del eje de bomba: 1639.80 m.s.n.m
- Cota en la descarga (tanque de almacenamiento): 1810.00 m.s.n.m
- Longitud de la tubería principal de succión: 4 m
- Longitud de la tubería principal de impulsión: 325 m
- Alturas estáticas de bombeo

Hes= 3.0 m, Hei= 168.7 m, H_{ET}= 171.7 m

- Parámetros de succión

En la Tabla 23 se encuentran los parámetros en la tubería de succión y el chequeo del diámetro y velocidad de succión.

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

Parámetro	Recomendación	Resultado	Unidad
Velocidad succión (1-1.5 m/s)	Recomendada	1.25	m/s
Caudal de diseño	Caudal de bombeo (Qb)	0.0051	m ³ /s
Diámetro de succión	$(4Qb/\pi Vel)^{0.5}$	2.8	in
Diámetro de succión	Diámetro interno tubería 3" RDE 26	82.04	mm
Diámetro de succión	Chequeo del diámetro	3.2	in
Velocidad succión	Chequeo de la velocidad	1	m/s

Fuente: Propia (2017).

En la Tabla 24 se encuentran los accesorios en la línea de succión y la longitud equivalente para calcular las pérdidas por fricción.

Tabla 24. *Accesorios en la tubería de succión (longitud equivalente).*

Accesorios	L (m)	Le (m)
Longitud de tubería	4	
Válvula de pie		20
Codo radio largo		1.6
Reducción excéntrica		5
Long. Efec. Total		30.6

Fuente: Propia (2017).

Se calcularon las pérdidas por accesorios y tubería de succión utilizando la ecuación de Hazen-Williams, con longitud equivalente para cada accesorio, teniendo los siguientes parámetros:

C= 150, Q= 0.0051 m³/s, L= 30.6 m, d= 0.08 m

$$h_{fs} = \frac{10,675 * L * Q^{1,85}}{C^{1,85} * d^{4,87}} = \frac{10,675 * 30.6 * 0.0051^{1,85}}{150^{1,85} * 0.08^{4,87}} \rightarrow h_{fs} = 0.344 \text{ m}$$

- Carga dinámica de succión

$$CDTs = H_{es} + h_{fs}$$

$$CDTs = 3.0 + 0.3440 \rightarrow CDTs = 3.35 \text{ m}$$

- Parámetros de impulsión

En la Tabla 25 se encuentran los parámetros en la tubería de impulsión y el chequeo del diámetro y velocidad de impulsión.

Tabla 25. *Parámetros en la tubería de impulsión.*

Parámetro	Recomendación	Resultado	Unidad
Velocidad impulsión (1.5-2.5m/s)	Recomendada	1.5	m/s
Caudal de diseño	Caudal de bombeo (Qb)	0.0051	m ³ /s
Diámetro de impulsión	$(4Qb/\pi Vel)^{0.5}$	2.6	in
Diámetro de impulsión	Diámetro interno tubería 2 ½" RDE 21	66.06	mm
Diámetro de impulsión	Chequeo del diámetro	2.6	in
Velocidad de impulsión	Chequeo de la velocidad	1.5	m/s

Fuente: Propia (2017).

En la Tabla 26 se encuentran los accesorios en la línea de impulsión y la longitud equivalente para calcular las pérdidas por fricción.

Tabla 26. *Accesorios en la tubería de impulsión (longitud equivalente).*

Accesorios	L (m)	Le (m)
Longitud de tubería	180	
Válvula de chek		9.7
Válvula de compuerta		0.5
Medidor de flujo		1
Manómetro		1
Reducción concéntrica		5
Long. Efec. Total		197.2

Fuente: Propia (2017).

La tubería de 2 ½" de RDE 21 cumple con la velocidad de impulsión, pero no soporta la presión requerida por el sistema de bombeo, por ello se escogió una tubería de 3" de RDE 13.5 (no hay tubería comercial de diámetro 2 ½" para RDE 13.5). Las pérdidas por accesorios y en la tubería de impulsión se calcularon con la ecuación de Hazen-Williams, utilizando longitud equivalente para cada accesorio.

Tramo 1. Tubería RDE 21 de 2 ½"

$$C = 150, Q = 0.0051 \text{ m}^3/\text{s}, L = 197.2 \text{ m}, d = 0.066 \text{ m}$$

Las dimensiones de la bomba son 30 cm de ancho, 154 cm de alto y 25.6 cm de profundidad. La referencia del motor eléctrico es clase de eficiencia IE3, potencia nominal de 15 kW, frecuencia de alimentación de 50 Hz, velocidad nominal entre 2930 y 2950 rpm y eficiencia del 91.9%.

- Potencia hidráulica: **Ph (kW)** = $\gamma Q H = 9.81 \text{ (kN/m}^3\text{)} \times 0.0051 \text{ (m}^3\text{/s)} \times 180.81 \text{ (m)} \rightarrow \mathbf{Ph = 9.05 \text{ kW}}$

- Potencia mecánica: Eficiencia de la bomba= 72.8%, Eficiencia del motor eléctrico= 91.9%

Pm (kW) = $(Ph) / (E_B E_M) = 9.05 \text{ kW} / (0.728 \times 0.919) \rightarrow \mathbf{Pm = 13.53 \text{ kW}}$

7.6.3 Punto real de operación del sistema (PRO)

En la Ilustración 27 se indica el punto real de operación de la bomba centrífuga seleccionada, resultado de la intercepción entre la curva característica de la bomba (catálogo del fabricante) y la del sistema de tuberías ($HD = H_{ET} + QK^{1.85}$), donde:

$$H_{ET} = 171.7 \text{ m, } Q = \text{variable, } K^{1.85} = K = \left[\left(\frac{10,675 * L_s}{C^{1.85} * d_s^{4.87}} \right) + \left(\frac{10,675 * L_i}{C^{1.85} * d_i^{4.87}} \right) \right]$$

El punto real de operación, según la Ilustración 27, es 5.1 lps de caudal y 180.5 m de carga dinámica total.

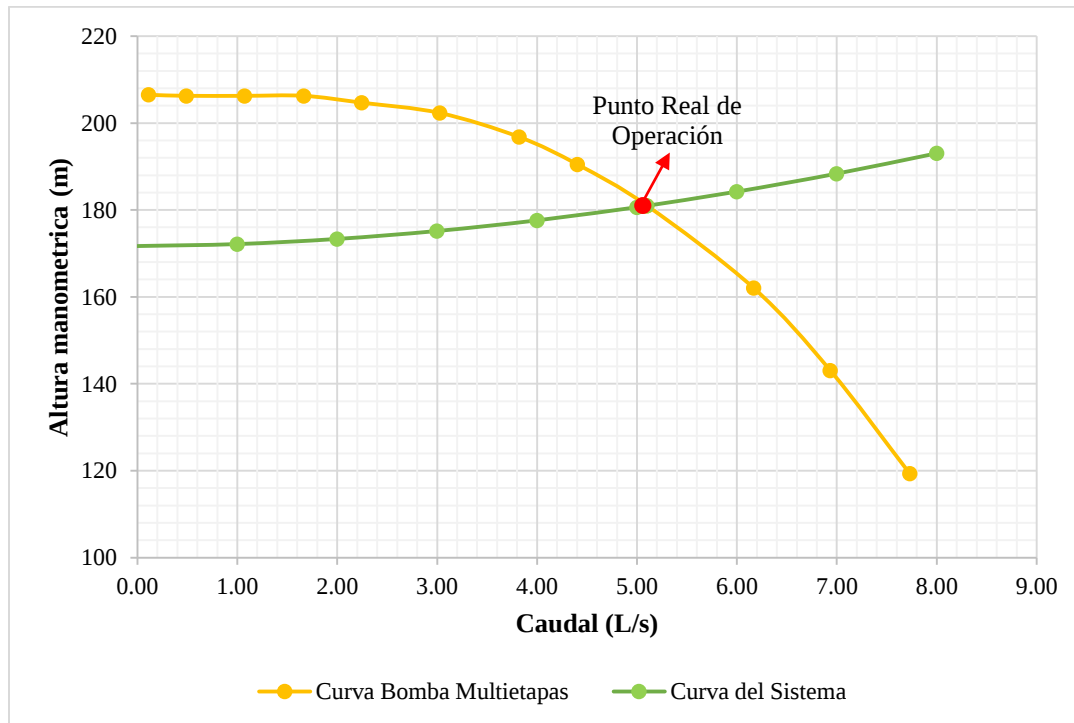


Ilustración 27. Punto real de operación del sistema de bombeo eléctrico.

Fuente. Propia (2017).

7.6.4 Cavitación

El NPSH requerido por la bomba: se obtiene de las curvas características.

El NPSH disponible se calcula de la siguiente manera:

$$\text{NPSH}_{\text{disponible}} = H_a - H_v - H_s - H_{fs}$$

$$\text{NPSH}_{\text{disponible}} = 8.20 - 0.23 - 3.0 - 0.35 \rightarrow \text{NPSH}_{\text{disponible}} = 4.62 \text{ m}$$

$$\text{NPSH}_{\text{requerido}} = 1.7 \text{ m}$$

El criterio para determinar si se presenta cavitación o no en la bomba es el siguiente:

$$\text{NPSH}_D > \text{NPSH}_R \rightarrow 4.62 \text{ m} > 1.70 \text{ m} \rightarrow 2.92 \text{ m de diferencia es decir } \underline{\text{No ocurrirá Cavitación}}$$

7.6.5 Sumergencia

En la Ilustración 28 se presenta la distancia a la cual debe estar ubicada la tubería respecto al espejo de agua en el pozo de succión para evitar el paso de aire a la tubería de succión y tener un óptimo funcionamiento de la bomba.

Cálculo de la sumergencia (S):

$$S \geq 2.5D_s + 0.1 \rightarrow S \geq 2.5(0.082 \text{ m}) + 0.1 \rightarrow S \geq 0.30 \text{ m}$$

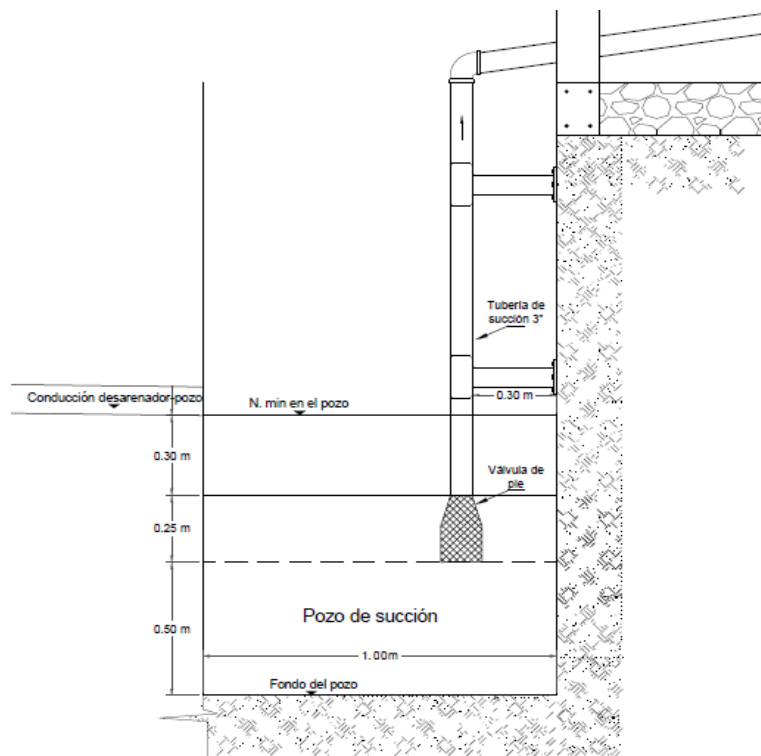


Ilustración 28. Distancia de sumergencia en el pozo de succión.

Fuente. Propia (2017).

7.6.6 Pozo de succión

El volumen debe ser el equivalente a retener el caudal de bombeo de 3 a 5 minutos, con el fin de evitar sedimentación de partículas en el tanque (ver Ilustración 28). Tiempo de retención adoptado: $\theta = 5$ min.

- **Volumen:** $V = Q \times \theta = 0.0051 \times 5 \times 60 = 1.53 \text{ m}^3$

- **Área mínima:** $A_{\min} = 5 \times D_s \rightarrow A_{\min} = 5 \times 0.082 \rightarrow A_{\min} = 0.41 \text{ m}^2$

- **Sumergencia:** $S = 0.30 \text{ m}$

- **Altura de la válvula de pie de 3":** $H_{\text{vál}} = 0.25 \text{ m}$

- **Distancia entre la válvula de pie y el fondo del pozo:** $H_{\text{vál-pozo}} = 0.5 \text{ m}$

- **Altura del pozo** = $(N_{\text{máx}} - N_{\text{mín}}) + S + H_{\text{vál}} + H_{\text{vál-pozo}} + BL$

Altura del pozo = $2 + 0.3 + 0.25 + 0.5 + 0.25 \rightarrow$ **Altura del pozo = 3.30 m**

- **Área del pozo:** $A_{\text{pozo}} = \frac{\text{Volumen pozo}}{\text{Altura pozo}} = \frac{1.53}{3.30} = 0.464 \text{ m}^2 > A_{\min} = 0.41 \text{ m}^2$

Adoptando una sección rectangular (2:1) se tiene que:

$$B = \sqrt{\frac{A}{2}} \rightarrow B = \sqrt{\frac{0.464}{2}} \rightarrow \mathbf{B = 0.5 \text{ m}}, \quad L = 0.5 \times 2 \rightarrow \mathbf{L = 1.0 \text{ m}}$$

Se adoptan las siguientes dimensiones para el pozo de succión: $B = 0.50 \text{ m}$ y $L = 1.0 \text{ m}$.

Se debe colocar un tapón para realizar la limpieza de sedimentos en el pozo.

7.6.7 Caseta de bombeo

El diseño de la caseta de bombeo se encuentra en el Anexo 10, donde estará alojado el centro de control de motores (C.C.M.) para el encendido y apagado de la bomba centrífuga, el cercado perimetral será de muro. Se colocó una escalera para realizar el mantenimiento. La base de la bomba se calculará según GRUNDFOS, como se muestra en la Ilustración 29.

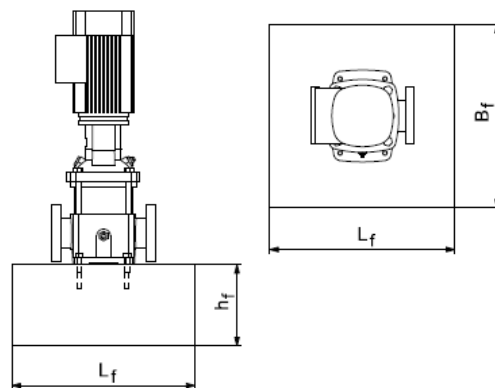


Ilustración 29. Dimensionamiento de la base de la bomba centrífuga.

Fuente. Grundfos (n.d.).

Donde:

$$L_f = 250 \text{ mm} + \text{largo bomba} = 250 + 300 \rightarrow L_f = \mathbf{0.55 \text{ m}}$$

$$B_f = 250 \text{ mm} + \text{ancho bomba} = 250 + 256 \rightarrow B_f = \mathbf{0.51 \text{ m}}$$

$$m_{\text{bomba}} = 169 \text{ Kg} \quad \delta_{\text{hormigón}} = 2400 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$h_f = \frac{m_{\text{bomba}} * 1.5}{L_f * B_f * \delta_{\text{hormigón}}} = \frac{169 * 1.5}{0.55 * 0.51 * 2400} \rightarrow h_f = \mathbf{0.38 \text{ m}}$$

El plano final del diseño del bombeo eléctrico se presenta en el Anexo 10, plano No. 3.

7.7 Bombeo solar fotovoltaico

La bomba centrífuga para este diseño será la misma seleccionada en el bombeo por energía eléctrica dado que sólo se cambió la fuente de energía. Se realizó un sistema autónomo fotovoltaico debido a que se desea que los costos de operación del sistema sean mínimos, siguiendo la metodología de Méndez (2011).

7.7.1 Parámetros y datos de diseño

- Consumo de energía

La potencia nominal del motor es de **15.00 kW**, el cual estará funcionando 1 hora; por lo tanto, la energía consumida será **15.00 kW-h**. El motor eléctrico tiene una frecuencia de alimentación de 50 Hz, tensión nominal 220 V conexión trifásica en triángulo, corriente nominal 48.5 A.

- Período de diseño

Asumiendo una probabilidad de excedencia del 75% para la irradiación solar en la vereda Betania, Ginebra, Valle del Cauca, se obtiene un valor de **3.5 kWh/m²/día**. El período de diseño fotovoltaico será anual considerando que la bomba eléctrica tendrá un consumo de energía eléctrica constante durante todo el año.

- Constante de diseño: **K= 1.15** (para período de diseño anual)
- Irradiación mínima sobre una superficie horizontal: **G_{dm}(0) = 3.5 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ día**
- Orientación e inclinación óptimas

La finca se encuentra ubicada en el hemisferio norte, por lo tanto, los paneles deben de estar orientados hacia el sur.

- Latitud: **Φ= 3.75**
- Ángulo de inclinación óptimo en función del período de diseño: **β_{opt}=13.75**, para consumos constantes a lo largo del año (**β_{opt} = |Φ| + 10°**)
- Ángulo de inclinación respecto a horizontal del módulo solar: **β_r=15.00**, se recomienda que no sea inferior a 15°, García (1999)
- Ángulo de orientación: **α_r= 10.00** al Este (debido a que se presentan sombras por zona verde)

- Factor de irradiación

$$FI = 1 - [1.2 \times 10^{-4}(\beta_r - \beta_{opt})^2], \text{ para } \beta_r \leq 15^\circ$$

$$FI = 1 - [1.2 \times 10^{-4}(15 - 13.75)^2] \rightarrow \mathbf{FI = 1.00}$$

- Factor de sombreado

En el lugar del bombeo se encuentra guadua y zona verde, lo cual origina sombras que afectan la eficiencia de los paneles solares, ocasionando una disminución de la energía generada. Para ello se estima un porcentaje de pérdidas por sombreado del 10% máximo permisible.

$$FS = \frac{100 - \text{Pérdidas por sombreado (\%)}}{100} \rightarrow FS = \frac{100 - 10 (\%)}{100} \rightarrow \mathbf{FS = 90\%}$$

- Radiación solar diaria sobre plano orientado

$$G_{dm}(\alpha_r, \beta_r) = G_{dm}(0) \cdot K \cdot FI \cdot FS \rightarrow G_{dm}(\alpha_r, \beta_r) = 3.5 * 1.15 * 1.0 * 0.9$$

$$\rightarrow \mathbf{G_{dm}(\alpha_r, \beta_r) = 3.62 \frac{kWh}{m^2} \text{ día}}$$

- Potencia mínima del generador
- Performance ratio (rendimiento sistema con inversor y batería): PR=0.6
- Irradiancia solar en CEM: $G_{CEM} = 1.0 \text{ kW/m}^2$

$$P_{mp.min} = \frac{E_d * G_{CEM}}{G_{dm}(\alpha_r, \beta_r) * PR} \rightarrow P_{mp.min} = \frac{15.0 * 1.0}{3.62 * 0.6} \rightarrow \mathbf{P_{mp.min} = 6.90 \text{ kW}}$$

- Potencia máxima del generador

La $P_{mp.min}$ del panel se puede incrementar hasta un 20% como margen de seguridad.

$$P_{mp.máx.} = (1 + \%) P_{mp.min} \rightarrow P_{mp.máx.} (1 + 0.2) 6.90 \rightarrow \mathbf{P_{mp.máx.} = 8.28 \text{ kW}}$$

- Tensión de trabajo

La tensión de trabajo es de 48 V.

En la Tabla 27 se relacionan los parámetros que se tuvieron en cuenta para el cálculo de la radiación prevista en la ubicación seleccionada y la potencia máxima total de los paneles solares a instalar en un sistema con baterías.

Tabla 27. Dimensionamiento del bombeo solar fotovoltaico con baterías.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Potencia nominal del motor eléctrico	Pm	15	kW
Horas de bombeo	Hb	1	hora
Ubicación	Vereda Betania; Ginebra, Valle del Cauca		
Latitud	ϕ	3.754	
Consumo de energía	E_d	15	kWh-día
Período de diseño	Mes	Anual	
Radiación solar	$G_{dm}(0)$	3.5	kWh/m ² /día

Constante de diseño	K	1.15	Período anual
Ángulo de inclinación óptimo en función del período de diseño	β_{opt}	13.75	Grados
Ángulo de inclinación respecto a horizontal del módulo solar	β_r	15	Grados
Orientación	a_r	10	Grados
Irradiancia solar en CEM	G_{CEM}	1	kW/m ²
Factor de irradiación	FI	1	
Porcentaje de pérdidas por sombreado		10	%
Factor de sombras	FS	0.9	
Performance ratio (rendimiento del sistema con inversor y batería)	PR	0.6	
Radiación solar diaria sobre plano orientado (α_r, β_r)	$G_{dm}(\alpha_r, \beta_r)$	3.62	kWh/m ² /día
Potencia mínima del generador	$P_{mp, min}$	6.9	kW
Potencia máxima del generador	$P_{mp, máx}$	8.28	kW
Tensión de trabajo	-	48	V

Fuente: Propia (2017).

En la Tabla 28 se presentan los parámetros considerados para el cálculo de la radiación prevista en la ubicación seleccionada y la potencia máxima total de los paneles solares a instalar en un sistema sin baterías.

Tabla 28. Dimensionamiento del bombeo solar fotovoltaico sin baterías.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Performance ratio (rendimiento del sistema con inversor)	PR	0.7	
Radiación solar diaria sobre plano orientado (α_r, β_r)	$G_{dm}(\alpha_r, \beta_r)$	3.62	kWh/m ² /día
Potencia mínima del generador	$P_{mp, min}$	5.92	kW
Potencia máxima del generador	$P_{mp, máx}$	7.1	kW
Tensión de trabajo	-	48	V

Fuente: Propia (2017).

7.7.2 Dimensionado del sistema fotovoltaico con baterías

7.7.2.1 Paneles fotovoltaicos

En el mercado existe gran variedad de paneles; se escogió un panel policristalino debido a su precio y su eficiencia de 17.2%, la ficha técnica se incluye en el Anexo 5 y en la Tabla 29 se presentan las características principales del panel seleccionado.

Tabla 29. Datos del panel solar fotovoltaico.

Parámetro	Símbolo	Resultado	Unidad
Marca		SIEMENS	
Modelo	-	AMPASOLAR 280	
Potencia nominal	P_{mp}	280	Wp
Tolerancia	Tol	3	%
Tensión a máxima potencia	V_{MP}	31.8	V

Corriente a máxima potencia	I_{MP}	8.81	A
Tensión nominal panel	T_{mp}	24	V
Eficiencia		17.2	%
Corriente de cortocircuito	I_{CC}	9.09	A

Fuente: Propia (2017).

- Número de módulos totales necesarios (mínimo)

$$Nm_{\min} = \frac{P_{mp,\min}}{P_{mp}} = \frac{6900}{280} \rightarrow Nm_{\min} = 25 \text{ paneles}$$

Potencia total a instalar (mínima)

$$Pt_{\min} = P_{mp} * Nm_{\min} = 280 * 25 \rightarrow Pt_{\min} = 7000 \text{ Wp}$$

- Número de módulos totales necesarios (máximo)

$$Nm_{\max} = \frac{P_{mp,\max}}{P_{mp}} = \frac{8280}{280} \rightarrow Nm_{\max} = 30 \text{ paneles}$$

- Potencia total a instalar (máxima)

$$Pt_{\max} = P_{mp} * Nm_{\max} = 280 * 30 \rightarrow Pt_{\max} = 8400 \text{ Wp}$$

- Número de módulos en serie

$$Nm_{\text{serie}} = \frac{\text{Tensión de trabajo}}{T_{mp}} = \frac{48 \text{ V}}{24 \text{ V}} \rightarrow Nm_{\text{serie}} = 2 \text{ paneles}$$

- Número de módulos en paralelo

$$Nm_{\text{paralelo}} = \frac{Nm_{\max}}{Nm_{\text{serie}}} = \frac{30}{2} \rightarrow Nm_{\text{paralelo}} = 15 \text{ paneles}$$

- Potencia por rama

$$\text{Potencia por rama} = Nm_{\text{serie}} * P_{mp} = 2 * 280 \rightarrow \text{Potencia por rama} = 560 \text{ Wp}$$

- Tensión por rama

$$\text{Tensión por rama} = Nm_{\text{serie}} * T_{mp} = 2 * 24 \rightarrow \text{Tensión por rama} = 48 \text{ V}$$

- Intensidad de cortocircuito del generador I_{CC} (gen,CEM)

$$I_{CC}(\text{gen, CEM}) = Nm_{\text{paralelo}} * I_{CC} = 15 * 9.09 \rightarrow I_{CC}(\text{gen, CEM}) = 136.35 \text{ A}$$

En la Tabla 30 se presentan los resultados del dimensionamiento de los paneles solares fotovoltaicos con baterías.

Tabla 30. Resultados del dimensionamiento de los paneles solares fotovoltaicos.

Parámetro	Símbolo	Resultado	Unidad
Número de módulos totales necesarios (mínimo)	$Nm_{\min}$	25	Uds
Potencia total a instalar	$Pt_{\min}$	7000	Wp
Número de módulos totales necesarios (máximo)	$Nm_{\max}$	30	Uds

Potencia total a instalar	$Pt_{m\acute{a}x}$	8400	Wp
Número de módulos en paralelo	$Nm_{paralelo}$	15	Uds
Número de módulos en serie	Nm_{serie}	2	Uds
Potencia por rama	-	560	Wp
Tensión por rama	-	48	V
Intensidad de cortocircuito del generador ICC(gen,CEM)	$Icc(gen,CEM)$	136.35	A

Fuente: Propia (2017).

7.7.2.2 Batería

Se pretende generar energía, es decir, el consumo diario de la carga para que se pueda utilizar durante 3 días sin sol y no permitiendo una descarga mayor del 60%.

- Consumo medio diario de la carga: $L_D = \frac{1000 \cdot E_d}{\text{Tensión de trabajo}} = \frac{1000 \cdot 15}{48} \rightarrow L_D = 312.5 \text{ Ah}$
- Días de autonomía: **A=2 días**
- Profundidad de descarga máxima: **PD_{máx} = 0.6**
- Eficiencia del inversor: **$\eta_{inv} = 0.95$** (catálogo)
- Eficiencia del controlador-batería: **$\eta_{rb} = 0.86$** (catálogo)
- Capacidad nominal de la batería en C₂₀: $C_{20} = \frac{A \cdot L_D}{PD_{m\acute{a}x} \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{rb}} = \frac{2 \cdot 312.5}{0.6 \cdot 0.95 \cdot 0.86} \rightarrow C_{20} = 1282.4 \text{ Ah}$
- Capacidad nominal de la batería en C₁₀: $C_{10} = \frac{C_{20}}{1.17} = \frac{1282.4}{1.17} \rightarrow C_{10} = 1096.1 \text{ Ah}$

Se escogió baterías tipo VRLA en gel, marca Mtek, distribuidor COLPILAS, referencia MT122050FT (12V205AH), que presentan las siguientes características: Voltaje nominal de 12 V, capacidad nominal C₁₀ @ 20°C de 205 Ah, aproximadamente entre 800 y 100 ciclos, en el Anexo 6 se incluye el catálogo de la batería. La capacidad nominal C₁₀ significa que la capacidad de descarga de la batería durará 10 horas sin que la tensión entre los bornes se disminuya. Es decir, la batería seleccionada de 205 Ah podrá suministrar durante 10 horas 20.5 A.

- Se calculó el número de baterías que requiere el sistema:

$$N_{\text{batería}} = \frac{C_{10}}{C_{10} \text{ batería}} = \frac{1096.1}{205} \rightarrow N_{\text{batería}} = 6 \text{ Uds}$$

7.7.2.3 Controlador de carga

Intensidad máxima a soportar por controlador:

Intensidad máxima a soportar por controlador en la línea de generador (entrada):

$$I_{\text{REG Generador}} = 1.25 I_{CC \text{ CEM}} = 1.25 \cdot 136.35 \rightarrow I_{\text{REG Generador}} = 170.44 \text{ A}$$

$$I_{\text{REG Generador Total}} = I_{\text{REG Generador}} \cdot N_{m \text{ serie}} = 170.44 \text{ A} \cdot 2 \rightarrow I_{\text{REG Generador Total}} = 340.88 \text{ A}$$

Intensidad máxima a soportar por controlador en la línea de consumo (salida):

$$I_{REG \text{ Consumo}} = 1.25 I_{M\acute{a}x \text{ Carga}} = 1.25 \cdot 68.2 \rightarrow I_{REG \text{ Consumo}} = 85.25 \text{ A}$$

Se escogi3 un controlador MPPT por las ventajas que ofrece este tipo de controladores. Las caracter3sticas del controlador son las siguientes: Tensi3n nominal 48 V DC, corriente m3xima 60 A, marca OutBack Power, serie Flexmax 60 (FM60-150VDC) y rendimiento del 98.1%. La ficha t3cnica se encuentra en el Anexo 7.

- Se calcul3 el n3mero de controladores que requiere el sistema:

$$N_{Controlador} = \frac{I_{REG \text{ Generador total}}}{I_{Controlador \text{ nominal}}} = \frac{340.88}{60 \text{ A}} \rightarrow N_{Controlador} = 6 \text{ Uds}$$

Se adoptan 6 controladores en paralelo.

7.7.2.4 Inversor

Teniendo como datos la potencia de entrada al inversor los 15 kW requeridos por el motor y la eficiencia del inversor (supuesta) del 95%, se calcula la potencia del inversor en DC as3:

$$Potencia_{Inversor \text{ DC}} = \frac{15.0 \text{ kW}}{0.95} = 15.8 \text{ kW}$$

Se revisaron varios cat3logos y se escogi3 un inversor que soporta una entrada de potencia nominal en DC de 15.8 kW. Una vez seleccionado el inversor se realiz3 un ajuste al c3lculo de la potencia del inversor en DC con la eficiencia real suministrada por el fabricante. Se escogi3 un inversor tipo onda senoidal pura, marca Eversol TLC15K el cual tiene las siguientes caracter3sticas: Potencia nominal en DC de 15.6 kW, potencia nominal en AC de 15.0 kW, tensi3n nominal de salida de 220 V, frecuencia de operaci3n de 50 Hz y eficiencia del 98%, ver la ficha t3cnica en el Anexo 8.

$$Potencia_{Inversor \text{ DC}} = \frac{15.0 \text{ kW}}{0.98} = 15.3 \text{ kW (Potencia real de entrada al inversor)}$$

7.7.2.5 Cableado

Teniendo en cuenta las p3rdidas entre el panel y el controlador de 3%, controlador y bater3a de 1%, bater3a e inversor de 1%, panel e inversor de 3%, e inversor y cargas de 3%, se calcul3 el di3metro comercial seg3n la AWG y los resultados se presentan en la Tabla 31.

Tabla 31. Tipo de cable seg3n la AWG para cada componente.

Cableado	I (A)	L (m)	V ₁₋₂ (V)	S (mm ²)	AWG
Panel a panel	8.81	1.00	0.24	1.31	16
Panel al controlador	132.15	10.00	1.44	32.78	2
Controlador a la bater3a	60.00	2.80	0.48	12.50	6
Bater3a al inversor	22.00	5.00	0.48	8.18	7
Inversor a la carga	68.18	10.00	6.60	3.69	11

Fuente: Propia (2017).

7.7.2.6 Soporte para paneles

Se escogió una estructura tipo A metálica asegurada con pernos, hecha para paneles con potencia mayor a 280 W instalada al suelo, como se observa en la Ilustración 30; en el anexo 10 se presenta un esquema de distribución en planta del bombeo solar fotovoltaico con y sin baterías, plano No. 6.

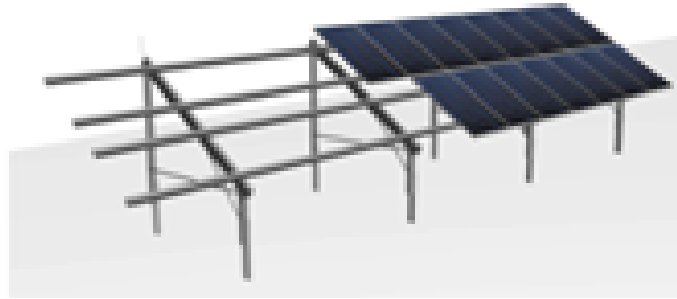


Ilustración 30. Sistema de armazón para paneles solares.

Fuente. Restrepo (2016).

7.7.3 Dimensionado del sistema fotovoltaico sin baterías

7.7.3.1 Paneles fotovoltaicos

- Número de módulos totales necesarios (mínimo)

$$Nm_{\min} = \frac{P_{mp,\min}}{P_{mp}} = \frac{5920}{280} \rightarrow \mathbf{Nm_{\min} = 22 \text{ paneles}}$$

Potencia total a instalar (mínima)

$$Pt_{\min} = P_{mp} * Nm_{\min} = 280 * 22 \rightarrow \mathbf{Pt_{\min} = 6160 \text{ Wp}}$$

- Número de módulos totales necesarios (máximo)

$$Nm_{\max} = \frac{P_{mp,\max}}{P_{mp}} = \frac{7100}{280} \rightarrow \mathbf{Nm_{\max} = 26 \text{ paneles}}$$

- Potencia total a instalar (máxima)

$$Pt_{\max} = P_{mp} * Nm_{\max} = 280 * 26 \rightarrow \mathbf{Pt_{\max} = 7280 \text{ Wp}}$$

- Número de módulos en serie

$$Nm_{\text{serie}} = \frac{\text{Tensión de trabajo}}{\text{Configuración panel}} = \frac{48}{24} \rightarrow \mathbf{Nm_{\text{serie}} = 2 \text{ paneles}}$$

- Número de módulos en paralelo

$$Nm_{\text{paralelo}} = \frac{Nm_{\max}}{Nm_{\text{serie}}} = \frac{26}{2} \rightarrow \mathbf{Nm_{\text{paralelo}} = 13 \text{ paneles}}$$

- Potencia por rama

Potencia por rama = $Nm_{serie} * P_{mp} = 2 * 280 \rightarrow$ **Potencia por rama = 560 Wp**

- Tensión por rama

Tensión por rama = $Nm_{serie} * Configuración = 2 * 24 \rightarrow$ **Tensión por rama = 48 V**

- Intensidad de cortocircuito del generador $I_{CC} (gen, CEM)$

$I_{CC}(gen, CEM) = Nm_{paralelo} * I_{CC} = 13 * 9.09 \rightarrow$ **$I_{CC}(gen, CEM) = 118.17 A$**

En la Tabla 32 se presentan los resultados del dimensionamiento de los paneles solares fotovoltaicos sin baterías.

Tabla 32. Resultados del dimensionamiento de los paneles solares fotovoltaicos.

Parámetro	Símbolo	Resultado	Unidad
Número de módulos totales necesarios (mínimo)	Nm_{min}	22	Uds
Potencia total a instalar	Pt_{min}	6160	Wp
Número de módulos totales necesarios (máximo)	Nm_{max}	26	Uds
Potencia total a instalar	Pt_{max}	7280	Wp
Número de módulos en paralelo	$Nm_{paralelo}$	13	Uds
Número de módulos en serie	Nm_{serie}	2	Uds
Potencia por rama	-	560	Wp
Tensión por rama	-	48	V
Intensidad de cortocircuito del generador $ICC(gen, CEM)$	$Icc(gen, CEM)$	118.17	A

Fuente: Propia (2017).

7.7.3.2 Inversor

Se escogió un inversor tipo onda senoidal pura, marca Eversol TLC15K, las características del inversor se encuentran en el Anexo 8.

7.7.3.3 Cableado

Se calculó el diámetro comercial según la AWG y los resultados se presentan en la Tabla 33 para el sistema solar fotovoltaico sin baterías.

Tabla 33. Cableado para sistema solar sin baterías.

Cableado	I (A)	L (m)	V_{1-2} (V)	S (mm ²)	AWG
Panel a panel	8.81	1.00	0.24	1.31	16
Panel a inversor	60.00	15.00	1.44	22.32	3
Inversor a la carga	68.18	10.00	6.60	3.69	11

Fuente: Propia (2017).

7.8 Bombeo hidráulico Rueda ROCHFER

7.8.1 Parámetros de diseño

Del plano topográfico y del plano del perfil del terreno se determinaron las siguientes cotas:

- Cota mínima en la válvula de succión: 1638.5 m.s.n.m
- Cota en la descarga (tanque de almacenamiento): 1810 m.s.n.m
- Longitud de la tubería principal de succión: 4 m
- Longitud de la tubería principal de impulsión: 400 m

• Altura estática total: $H_{ET} = 1810 - 1638.5 \rightarrow H_{ET} = 171.50 \text{ m}$

• Parámetros de succión

Volumen de riego: 18360 L/día, caudal de riego: 0.2125 lps

$$\text{Diámetro de succión: } d_s = \frac{4 \cdot Q_b}{\pi \cdot V_s} = \frac{4 \cdot 0.00021}{\pi \cdot 1.25} \rightarrow d_s = 0.015 \text{ m} \approx 1/2''$$

$$\text{Diámetro de impulsión: } d_i = \frac{4 \cdot Q_b}{\pi \cdot V_i} = \frac{4 \cdot 0.00021}{\pi \cdot 1.5} \rightarrow d_i = 0.013 \text{ m} \approx 1/2''$$

Se realizó un análisis comparativo con dos diámetros comerciales de tubería PVC tubosistemas RDE 13.5 y 9 de diámetro 1/2'' para un volumen de riego de 18360 L/día, de lo cual ambas tuberías cumplen que la altura dinámica total (HD) sea menor a la presión máxima de la bomba ROCHFER (210 mca) y a la presión máxima soportada por la tubería PVC, pero la tubería de 1/2'' RDE 9 fue la única que cumplió con la velocidad mínima para el sistema ($\geq 1 \text{ m/s}$), el respectivo análisis se presenta en la Tabla 34 y en el Anexo 9.

Tabla 34. Parámetros en el sistema de bombeo ROCHFER.

RDE	Presión máx. Tubo (mca)	dn (in)	di (mm)	HD (m)	Vel. (m/s)	HD < Alt. Máx. Bomba	Cumple HD < Presión Tubería	Vel. de Impulsión
13.5	221.62	1/2"	18.18	191.4	0.8	SI	SI	NO
9	351.77	1/2"	16.6	202.43	1	SI	SI	SI

Fuente: Propia (2017).

En la Tabla 35 se registran los parámetros de la tubería de succión y el chequeo del diámetro y velocidad en la succión.

Tabla 35. Parámetros en la tubería de succión.

Parámetro	Recomendación	Resultado	Unidad
Velocidad succión (1-1.5m/s)	Recomendada	1.25	m/s
Caudal de diseño	Caudal de bombeo	0.00021	m ³ /s
Diámetro de succión	4Qb/PiVel	0.6	in
Diámetro de succión	Diámetro interno tubería RDE 9	16.6	mm
Velocidad de succión	Chequeo de la velocidad	1	m/s
Diámetro de succión	Chequeo del diámetro	0.65	in

Fuente: Propia (2017).

En la Tabla 36 se relacionan los accesorios en la línea de succión y las longitudes equivalentes, requeridas para calcular las pérdidas por fricción.

Tabla 36. Accesorios en la tubería de succión (longitud equivalente).

Accesorios	Diámetro (in)	Cantidad	LE unitario (m)	LE total (m)
Adaptador macho	1 ¼	4	0.5	2
Codo de 90°	1 ¼	3	1.1	3.3
Unión universal	1 ¼	2	0.9	1.8
Válvula de aspiración con filtro	1 ¼	1	19.9	19.9
Buje roscado	1¼ x ½	6	2	12
Total				39

Fuente: Propia (2017).

- Pérdidas por accesorios y tubería de succión

Con la ecuación de Hazen Williams se calcularon las pérdidas por accesorios y en la tubería en el sistema, los accesorios tienen un diámetro de 1 ¼”, como lo recomienda ROCHFER; los resultados se presentan en la Tabla 37.

Tabla 37. Pérdidas por accesorios y tubería en la succión.

Parámetro	Resultado	Unidad	Parámetro	Resultado	Unidad
C	150	Adim.	LE accesorios	39	m
Q	0.0002	m ³ /s	d accesorios	0.04	m
L tubería	4	m	hfs accesorios	0.051	m
d tubería	0.02	m	hfs total	0.803	m
hfs tubería	0.752	m			

Fuente: Propia (2017).

• Parámetros de impulsión

En la Tabla 38 se indican los parámetros en la tubería de impulsión y el chequeo del diámetro y velocidad de impulsión. Se utilizó el mismo diámetro de succión debido a que no hay tubería con el diámetro comercial de 1 ¼” que soporte la presión requerida por el sistema.

Tabla 38. Parámetros en la tubería de impulsión.

Parámetro	Recomendación	Resultado	Unidad
Caudal de diseño	Caudal de bombeo	0.0002	m ³ /s
Diámetro de impulsión	Diámetro interno tubería RDE 9	16.6	mm
Velocidad de impulsión	Chequeo de la velocidad	1	m/s

Fuente: Propia (2017).

En la Tabla 39 se detallan los accesorios en la línea de impulsión del sistema de bombeo con rueda hidráulica ROCHFER, cada uno con su respectiva longitud equivalente para calcular las pérdidas por Hazen-Williams y así construir la curva del sistema de bombeo.

Tabla 39. Accesorios en la tubería de impulsión (longitud equivalente).

Accesorios	Diámetro (in)	Cantidad	LE unitario (m)	LE total (m)
Adaptador macho	1 ¼	4	0.4	1.6

Codo de 90°	1 ¼	1	1.1	1.1
Unión universal	1 ¼	2	1	2
Tee SCHEDULE 40	1 ¼	1	2.3	2.3
Válvula de bola H2OFF soldada	1 ¼	1	15	15
Válvula de cheque horizontal	1 ¼	1	4	4
Buje roscado	1¼ x ½	7	1.2	8.4
			Total	34.4

Fuente: Propia (2017).

- Pérdidas en la tubería de impulsión

Con la ecuación de Hazen Williams se calcularon las pérdidas por accesorios y tubería de diámetro de 1 ¼", como lo recomienda ROCHFER; los resultados se presentan en la Tabla 40.

Tabla 40. Pérdidas por accesorios y tubería en la impulsión.

Parámetro	Resultado	Unidad	Parámetro	Resultado	Unidad
<i>C</i>	150	Adim.	<i>LE accesorios</i>	34.4	m
<i>Q</i>	0.0002	m ³ /s	<i>d accesorios</i>	0.04	m
<i>L tubería</i>	400	m	<i>hfi accesorios</i>	0.045	m
<i>d tubería</i>	0.02	m	<i>hfi total</i>	30.13	m
<i>hfi tubería</i>	30.085	m			

Fuente: Propia (2017).

- Carga dinámica total

$$\text{CDTi} = H_{ET} + h_{fs} + h_{fi} = 171.50 + 0.803 + 30.130 \rightarrow \text{CDTd} = 202.43 \text{ m}$$

7.8.2 Selección bomba ROCHFER

Del catálogo de ROCHFER se escogió la bomba MSG-70D de material acero al carbono, dimensiones de 1.90x0.36 m con una altura dinámica máxima de 210 m y volumen de almacenamiento de 17900 l/día, caudal de accionamiento del sistema de 30 l/s, soporte tipo B de material acero al carbono, 36 unidades de paletas, altura de accionamiento de 2.25 m (ROCHFER recomienda una altura mínima de 2.06 m) y distancia de bombeo 400 m. La bomba se diseñará para captar un volumen de 18360 l/día, las pérdidas en la línea de succión e impulsión se calcularon con la ecuación de Hazen-Williams, la altura dinámica total del sistema es de 202.43 m, ver Ilustración 31.

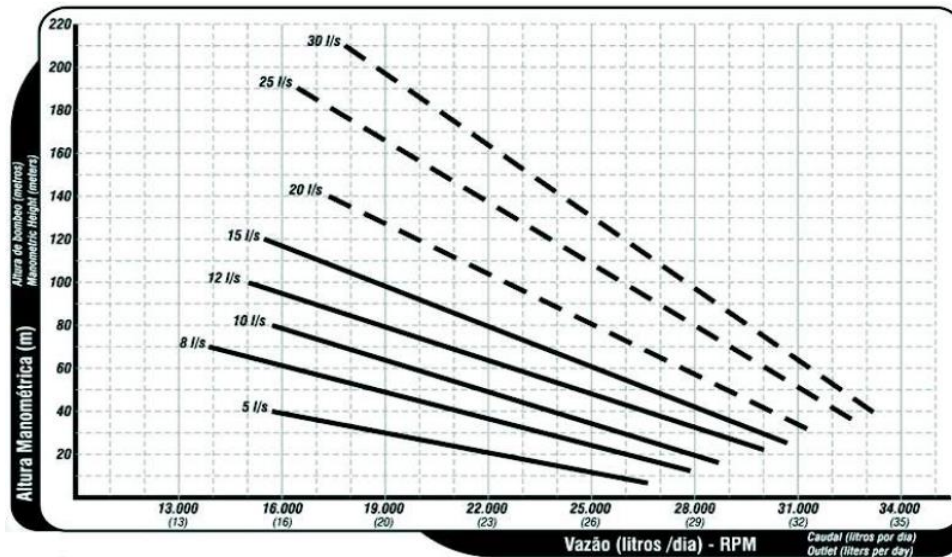


Ilustración 31. Curva característica de la bomba ROCHFER MSG-70D.

Fuente. ROCHFER (2015)

No se tuvo en cuenta el diámetro sugerido por ROCHFER debido a que no hay tubería comercial de 1 ¼” que soporte la presión requerida por el sistema de bombeo y, además, la velocidad para el caudal requerido es muy baja, alrededor de 0.37 m/s.

7.8.3 Punto real de operación del sistema (PRO)

De la Ilustración 32 se indica y se determina el punto real de operación de la bomba ROCHFER, obtenida de la intercepción de la curva del sistema y de la bomba.

PRO: CDT = 204.65 m, V= 18437 l/día

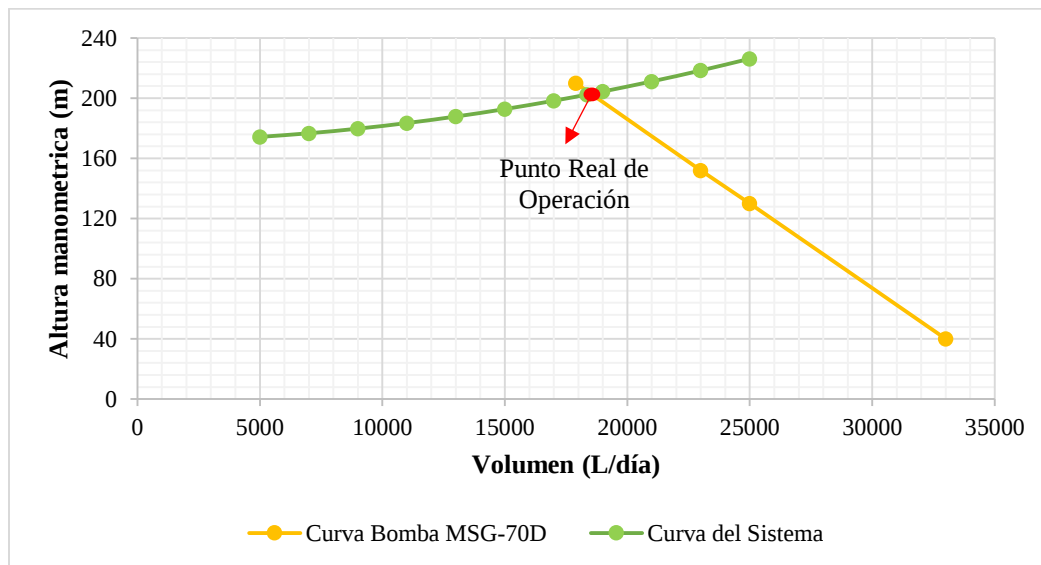


Ilustración 32. Punto real de operación del sistema de bombeo ROCHFER.

Fuente: Propia (2017).

7.8.4 Bocatoma con rejilla de fondo

Para tener un margen de seguridad en el caudal de diseño, se incrementará en un 12% el caudal de bombeo, quedando de la siguiente manera el caudal de diseño:

$$\text{Caudal de diseño} = \text{caudal de bombeo} * 1.12 = 30 \text{ lps} * 1.12 \rightarrow Q_d = 34 \text{ lps}$$

En la Tabla 41 se presentan los resultados obtenidos para el diseño de cada uno de los componentes de la bocatoma con rejilla de fondo, como la presa, la rejilla, el canal de aducción, la cámara de recolección, el caudal de excesos y la tubería de excesos.

Tabla 41. *Parámetros y resultados en el diseño de la captación ROCHFÉR.*

Parámetro	Símbolo	Resultado	Unidad
Presa			
Ancho del azud	L	1.5	m
Caudal diseño	Qd	0.034	m ³ /s
Profundidad de la lámina agua sobre el azud	H	0.05	m
Ancho del azud corregido	L'	1.49	m
Velocidad	Vr	0.43	m/s (cumple Vr > 0.3 m/s)
Rejilla y canal de aducción			
Alcance filo superior	Xs	0.32	m
Alcance filo inferior	Xi	0.19	m
Ancho del canal de aducción	B	0.42	m
Sepa. Entre barros (2-6 cm)	a	0.04	m
Ancho de los barros	b	0.03	m
Velocidad entre los barros	Vb	0.1	m/s
Área neta	An	0.38	m ²
Longitud rejilla	Lr	0.7	m
Área neta	An	0.18	m ²
Numero de orificios	N	11	
Área neta final	An	0.18	m ²
Velocidad entre los barros final	Vb	0.2	m/s
Longitud rejilla final	Lr	0.70	m
Niveles de agua en el canal de aducción son:			
Prof. aguas abajo	he	0.09	m
Longitud de canal de aducción	Lc	0.90	m
Pendiente del fondo del canal	i	0.03	
Prof. aguas arriba	ho	0.13	m
Altura al inicio del canal	Ho	0.28	m
Altura al final del canal	He	0.31	m
Vel al final del canal	Ve	0.93	m/s (cumple Ve > 0.6 m/s)
Cámara de recolección			
Alcance filo superior	Xs	0.49	m
Alcance filo inferior	Xi	0.29	m
Ancho de la cámara de recolección	B _{cámara}	0.79	m
Ancho de la cámara de recolección final	B _{cámara}	1	m
Caudal máximo del río	Q _{máx}	1.041	m ³ /s

Altura máxima del caudal máximo	H	0.52	m
Altura máxima de muro final	H	0.85	m
Caudal de excesos			
Caudal promedio del río	Qpr	0.104	m ³ /s
Altura de carga sobre el azud medio	Hm	0.11	m
Caudal captado	Qcap	0.082	m ³ /s
Caudal de excesos	Qexc	0.048	m ³ /s
Altura de excesos	Hexc	0.08	m
Velocidad de excesos	Vexc	0.55	m/s (cumple $V_e > 0.6$ m/s)
Alcance del chorro superior	Xs	0.39	m
Alcance del chorro inferior	Xi	0.25	m
Ancho de la evacuación de excesos	S	0.49	m
Tubería de excesos			
Pendiente	i	3.5	%
Gradiente	J	0.04	m/m
Diámetro	D	0.15	m
Diámetro	D	6	in

Fuente: Propia (2017).

Tubería de excesos: Tubería de PVC RDE 51 de 6" diámetro interior de 161.68 mm, 10 m de longitud.

7.8.5 Conducción bocatoma-rueda ROCHFER

Según la bomba seleccionada se requiere de 30 lps para el accionar de la rueda hidráulica, en la Tabla 42 se muestran los resultados del diseño de la conducción del agua desde la captación hasta la rueda ROCHFER.

Tabla 42. Resultados de diseño en la conducción bocatoma-rueda ROCHFER.

Parámetro	Símbolo	Resultado	Unidad	Recomendación
Caudal diseño	Qd	0.03	m³/s	
Coeficiente de manning para tubería PVC	n	0.01		
Longitud de conducción	L	35	m	
Pendiente de la tubería	S	1.971	%	
Diámetro interno tubería	D	0.154	m	Tubo 6" RDE 51
Caudal en la tubería llena	Qlleno	0.034	m ³ /s	
Velocidad en la tubería llena	Vlleno	1.655	m/s	>0.60 m/s
Relación entre Q _{diseño} y Q _{lleno}	Qd/Qll	0.883		Ver Anexo 2
Relación entre velocidades	Vr/Vll	0.99		Ver Anexo 2
Relación entre diámetros	d/D	0.77		
Velocidad	Vr	1.639	m/s	
Diámetro de la tubería	d	0.124	m	
Verificación de la cota a la salida de la bocatoma	cota	0.33	m	
Caudal de exceso máx. previsto	Qexceso	0.004	m ³ /s	

Fuente: Propia (2017).

Tubería de conducción: Tubería de PVC RDE 51 de 6" diámetro interior de 161.68 mm.

7.8.6 Base de la bomba

El diseño para la base de la bomba ROCHFER se encuentra en el Anexo 10, una losa de concreto ciclópeo con refuerzo, espesor de 20 cm, especificar los muros de contención de 1 m, y cada 3 metros se colocaron soportes para el sostenimiento de la tubería de accionamiento.

7.8.7 Pozo de succión

El pozo de succión se diseñará siguiendo las recomendaciones de ROCHFER, donde la distancia mínima desde la válvula de pie hasta el fondo del pozo debe ser mayor a 30 cm y desde la entrada de la bomba hasta la válvula de pie debe ser mayor a 50 cm (ver Anexo 10). Se colocó una válvula para realizar la limpieza de sedimentos en el pozo.

-Sumergencia: $S \geq 2.5D_s + 0.1 \rightarrow S \geq 2.5 * (0.013 \text{ m}) + 0.1 \rightarrow S \geq 0.14 \text{ m}$

- Altura de la válvula de aspiración 1 1/4": $H_{vál} = 0.23 \text{ m}$

- Distancia entre la válvula de pie y el fondo del pozo: $H_{vál-pozo} = 0.33 \text{ m} > 0.3 \text{ m}$

-Altura del pozo= $S + H_{vál} + H_{vál-pozo}$

Altura del pozo= $0.14 + 0.23 + 0.33 \rightarrow$ **Altura del pozo= 0.7 m**

Se adoptan las siguientes dimensiones para el pozo de succión: B= 0.40 m y L= 2.0 m.

El plano final del diseño del bombeo hidráulico se presenta en el Anexo 10, plano No. 4.

7.8.8 Canal de retorno

Mediante el software HCANALES se realizó el dimensionamiento del canal de retorno, para una transición de entrada alabeada en flujo subcrítico, ver Tabla 43.

Tabla 43. Resultados del dimensionamiento del canal de retorno.

Parámetro	Resultado	Unidad
Caudal	34.0	lps
Ancho de solera en la salida	0.5	m
Ancho de solera en la entrada	2.0	m
Talud al inicio del canal	0.0	
Talud al final del canal	0.0	
Tirante en la salida	0.3	m
Diferencia de cotas HZ	0.2	m
Coef. de pérdida en transición K	0.1	m
Tirante en la entrada del canal	0.5	m
Longitud de la transición	4.0	m
Número de tramos N	8.0	m

Fuente: Propia (2017).

7.9 Evaluación técnica-económica

7.9.1 Estimación de ingresos

La utilidad neta que va tener el inversionista será el ingreso monetario por la venta de zapallo a los centros de acopio menos los costos de producción del zapallo; estos datos fueron aportados en una hoja de cálculo por la Secretaría de Agricultura (2014) a través de la gobernación del Valle, ver Tabla 44.

Tabla 44. *Costos de producción por hectárea en el cultivo del zapallo*

Parámetro	Valor
Preparación de suelo	\$ 200,000.00
Siembra	\$ 40,000.00
Labores culturales	\$ 770,000.00
Cosecha	\$ 270,000.00
Insumos	\$ 920,000.00
Otros costos	\$ 350,000.00
Costo de producción total x Ha	\$ 2,550,000.00

Fuente: Propia (2017).

En la Tabla 45 se presenta la utilidad anual neta que el agricultor recibirá por la venta del zapallo.

Tabla 45. *Utilidad anual neta por la venta de zapallo*

Parámetro	Valor	Unidad
Rendimiento promedio	16.5	Ton/ha
Precio pagado al productor	\$ 350,000.00	\$/Ton
Ingreso bruto	\$ 5,775,000.00	\$/ha
Costos de producción	\$ 2,550,000.00	\$/ha
Utilidad	\$ 3,225,000.00	\$/ha
Área finca	0.8	ha
Cosechas al año	3	
Utilidad anual	\$ 7,740,000.00	\$/anual

Fuente: Propia (2017).

7.9.2 Evaluación de la tecnología

- Bombeo eléctrico

La bomba seleccionada es importada de EEUU pero los repuestos de la bomba GRUNDFOS se encuentran en Colombia; el término de garantía es de 24 meses a partir de la fecha de compra por defectos de fabricación y materiales. La recomendación del fabricante es reparar las bombas in situ si los motores tienen potencia igual o superior a 7.5 kW, en nuestro caso es una bomba de 15.0 kW. Si la bomba requiere inspección por el fabricante se deben enviar los detalles relacionados con el líquido bombeado, el caudal y la presión de trabajo.

Hay que tener presente que si el motor va a permanecer sin funcionamiento durante más de 6 meses al año, se debe engrasar al finalizar el período de funcionamiento de la bomba. También se deben lubricar los cojinetes del motor cada 4500 o 1100 horas de funcionamiento si trabajan a temperaturas ambiente de 40°C o 60°C, respectivamente. Por otro lado, si el tablero de control presenta fallas se debe requerir la garantía para que envíen un técnico encargado para ello.

- Bombeo solar fotovoltaico

En general, se deben revisar los paneles, los controladores, las baterías, el inversor, los cables y los soportes. Los paneles solares con el pasar de los años van perdiendo potencia nominal, por ejemplo, a los 10 años se disminuye en un 10% y a los 25 años en un 80%. Los paneles no requieren de constante limpieza debido a la inclinación en que son ubicados, en caso de limpiarlos se debe hacer con un paño suave y agua cada que estén sucios, evitar el uso de detergentes y jabones. Se debe medir la tensión e intensidad en los arreglos fotovoltaicos y verificar que coincidan con los valores del fabricante.

Revisar que los paneles no tengan rayones, rompimiento o alteraciones en las celdas fotovoltaicas; dependiendo del daño se puede considerar cambiarlos. La limpieza es importante para un óptimo desempeño en la generación de energía eléctrica. Se deben revisar los pernos de los soportes que estén fijados adecuadamente; en caso de no estarlo se deben ajustar.

En el inversor se debe verificar que esté operando a la potencia de salida requerida por la bomba 15 kW. En el controlador de carga se deben revisar los parámetros de funcionamiento como el voltaje de entrada y salida, y asegurar que la batería funcione adecuadamente. La batería seleccionada no requiere mantenimiento debido a la tecnología seleccionada VRLA en GEL, pero sí se debe revisar que el nivel de voltaje sea el adecuado (12 V DC). Éstas se deben cambiar cada 5 años debido a su vida útil.

El mantenimiento preventivo y correctivo lo debe realizar una persona calificada como un técnico electricista o ingeniero electricista; se deben revisar todas las conexiones eléctricas, la cual se debe hacer mensual, semestral o anualmente, dependiendo de la disponibilidad del personal. Se debe hacer un mantenimiento semanal para detectar ruidos inusuales, corrosión, cables o conexiones sueltas, ya que esto afecta la eficiencia del sistema. En caso de daño de equipos se debe contactar al fabricante para su reemplazo.

- Bombeo con rueda hidráulica ROCHFER

La bomba ROCHFER seleccionada es importada de Brasil pero sus repuestos se consiguen en Colombia. La garantía de las bombas ROCHFER por productos completos es de 24 meses y para recambios de 3 meses. El mantenimiento mínimo que se le deben a hacer a las bombas es el cambio de aceite en el cárter, al cual se le llena con aceite SAE 30 o 40 antes de poner a funcionar la bomba; a los 30 días después de la instalación se debe realizar el primer cambio de lubricante y luego cada 4 meses. La revisión del nivel de aceite es mensual. Si hay reducción del caudal se debe verificar que los empaques no estén gastados por el constante movimiento de la rueda.

7.9.3 Estimación de inversión y costos de operación y mantenimiento

- Inversión

En el Anexo 11 se presenta el presupuesto detallado del bombeo eléctrico, incluyendo los costos de la obra civil, los equipos de bombeo y la tubería implementada. En la Tabla 46 se presenta el presupuesto global del bombeo eléctrico, incluyendo el AIU del 10% e IVA del 19%.

Tabla 46. *Presupuesto global del bombeo eléctrico*

Parámetro	Valor
Equipos	\$ 36,496,983.05
Tubería	\$ 19,005,114.65
Obra civil	\$ 23,757,195.13
Inversión total bombeo eléctrico	\$ 79,259,292.83

Fuente: Propia (2017).

En el Anexo 11 se presenta el presupuesto detallado de los equipos del bombeo solar fotovoltaico con baterías, también se incluyen los costos de la obra civil, los equipos de bombeo eléctrico y la tubería implementada (es la misma bomba utilizada en el bombeo eléctrico). En la Tabla 47 se presenta el presupuesto global del bombeo solar fotovoltaico con baterías, incluyendo el AIU del 10% e IVA del 19%.

Tabla 47. *Presupuesto global del bombeo solar fotovoltaico con baterías*

Parámetro	Valor
Bombeo solar fotovoltaico con baterías	\$ 87,524,110.32
Equipos	\$ 36,496,983.05
Tubería	\$ 19,005,114.65
Obra civil	\$ 23,757,195.13
Inversión total bombeo solar fotovoltaico con baterías	\$ 166,783,403.15

Fuente: Propia (2017).

En el Anexo 11 se presenta el presupuesto detallado de los equipos del bombeo solar fotovoltaico sin baterías, también se incluyen los costos de la obra civil, los equipos de bombeo eléctrico y la tubería implementada (es la misma bomba utilizada en el bombeo eléctrico). En la Tabla 48 se presenta el presupuesto global del bombeo solar fotovoltaico sin baterías, incluyendo el AIU del 10% e IVA del 19%.

Tabla 48. *Presupuesto global del bombeo solar fotovoltaico sin baterías*

Parámetro	Valor
Bombeo solar fotovoltaico sin baterías	\$ 57,862,825.00
Equipos	\$ 36,496,983.05
Tubería	\$ 19,005,114.65
Obra civil	\$ 23,757,195.13
Inversión total bombeo solar fotovoltaico sin baterías	\$ 137,122,117.83

Fuente: Propia (2017).

En el Anexo 11 se presenta el presupuesto detallado de los equipos del bombeo hidráulico con rueda ROCHFER, incluye los costos de la obra civil, los equipos de bombeo y la tubería implementada. En la Tabla 49 se presenta el presupuesto global del bombeo hidráulico con rueda ROCHFER, incluyendo el AIU del 10% e IVA del 19%.

Tabla 49. Presupuesto global del bombeo hidráulico ROCHFER

Parámetro	Valor
Equipos	\$ 19,896,606.10
Tubería	\$ 8,155,213.50
Obra civil	\$ 13,483,829.81
Inversión total bombeo hidráulico rueda ROCHFER	\$ 41,535,649.41

Fuente: Propia (2017).

- Costos anuales de operación y mantenimiento

Los costos de operación y mantenimiento del sistema solar fotovoltaico y el sistema hidráulico con rueda ROCHFER son mínimos, debido a que sólo requieren fuentes renovables para su accionar el sol y el agua, respectivamente, ver Tabla 50.

Tabla 50. Costo anual de operación y mantenimiento de los sistemas de bombeo

Tipo de bombeo	Costo anual de operación	Costo anual de mantenimiento	Costo OM total anual
Eléctrico	\$ 1,203,552.00	\$ 500,000.00	\$ 1,703,552.00
Solar fotovoltaico	\$ -	\$ 500,000.00	\$ 500,000.00
Hidráulico ROCHFER	\$ -	\$ 400,000.00	\$ 400,000.00

Fuente: Propia (2017).

7.9.4 Financiamiento de la inversión

Si el financiamiento lo realizara FINAGRO (Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario) la tasa de interés para los pequeños agricultores sería la DTF + 7% EA. La DTF para Colombia es del 5.99%, resultando en 12.99% EA la tasa de interés.

7.9.5 Análisis financiero

7.9.5.1 Flujo de caja libre

En el Anexo 12 se presentan el flujo de caja libre del inversionista y la tabla de amortización de la deuda para cada sistema de bombeo, teniendo en cuenta que el 100% de la deuda la va a financiar Finagro.

7.9.5.2 Rentabilidad financiera

En la Tabla 51 se presentan los criterios de VPN y TIR para cada alternativa de bombeo, comparando que pasaría si la entidad financiera Finagro presta el 100%, el 80% o el 50%, o si el agricultor paga la totalidad del costo de la inversión.

Tabla 51. Rentabilidad financiera para cada sistema de bombeo

% Recursos propios	% Deudas	Bombeo eléctrico		Bombeo solar fotovoltaico con baterías		Bombeo solar fotovoltaico sin baterías		Bombeo hidráulico ROCHFER	
		VPN	TIR	VPN	TIR	VPN	TIR	VPN	TIR
0	100	-\$ 49,805,528.69	-	-\$ 149,579,926.41	-	-\$ 107,906,717.11	-	-\$ 106,357.95	9%
20	80	-\$ 37,418,361.55	-	-\$ 123,513,911.73	-	-\$ 86,476,364.52	-	\$ 6,385,108.39	12%
50	50	-\$ 18,837,610.85	-24%	-\$ 84,414,889.72	-	-\$ 54,330,835.63	-	\$ 16,122,307.89	13%
100	0	\$ 12,130,306.99	3%	-\$ 19,249,853.02	-14%	-\$ 754,954.15	-8%	\$ 32,350,973.74	13%

Fuente: Propia (2017).

- Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó con el fin de determinar los escenarios en que resultaba factible el proyecto, teniendo como variables el área, el cual fue de 0.8 ha y de 1.6 ha (en caso de que el agricultor desee duplicar el área a cultivar); el número de cosechas que se pueden realizar al año (varía entre dos y tres), lo cual dependerá de las condiciones climáticas que se presenten, como por ejemplo el fenómeno de El Niño y La Niña, que afectan el rendimiento del cultivo por la falta o exceso de agua; y por último, el rendimiento, escogiendo valores de 15.15, 16.5 y 17.79 Ton/ha como mínimo, promedio y máximo, respectivamente, datos que fueron extraídos de las estadísticas de la gobernación del Valle del Cauca.

Se plantearon cuatro escenarios para un área de 0.8 ha, los cuales se pueden observar en la tabla 52. Se encontró que el bombeo solar fotovoltaico con baterías no resultaba rentable por el VPN negativo, el bombeo solar fotovoltaico sin baterías solo fue rentable en el cuarto escenario siempre y cuando el agricultor no financie la deuda, el bombeo eléctrico es factible en los escenarios 1,3 y 4 siempre y cuando el agricultor no financie la deuda. El bombeo hidráulico ROCHFER resulta rentable en casi todos los escenarios.

Tabla 52. Análisis de sensibilidad para un área de 0.8 ha

Parámetro	% Recursos propios	% Deudas	VPN			
			Bombeo eléctrico	Bombeo solar fotovoltaico con baterías	Bombeo solar fotovoltaico sin baterías	Bombeo hidráulico ROCHFER
1. Rendimiento: 15.15 Ton/ha, Cosechas al año: 3	0	100	-\$ 56,773,467.79	-\$ 156,547,865.51	-\$ 114,874,656.21	-\$ 7,074,297.05
	20	80	-\$ 44,386,300.65	-\$ 130,481,850.83	-\$ 93,444,303.62	-\$ 582,830.71
	50	50	-\$ 25,805,549.95	-\$ 91,382,828.82	-\$ 61,298,774.73	\$ 9,154,368.80
	100	0	\$ 5,162,367.89	-\$ 26,217,792.12	-\$ 7,722,893.25	\$ 25,383,034.64
2. Rendimiento: 16.5 Ton/ha, Cosechas al año: 2	0	100	-\$ 65,658,511.82	-\$ 133,726,943.28	-\$ 92,053,733.98	-\$ 15,959,341.08
	20	80	-\$ 53,271,344.69	-\$ 107,660,928.60	-\$ 70,623,381.39	-\$ 9,467,874.75
	50	50	-\$ 34,690,593.98	-\$ 68,561,906.58	-\$ 38,477,852.50	\$ 269,324.76
	100	0	-\$ 3,722,676.15	-\$ 3,396,869.89	-\$ 16,607,937.29	\$ 16,497,990.60
3. Rendimiento: 17.79 Ton/ha, Cosechas al año: 2	0	100	-\$ 61,219,676.54	-\$ 160,994,074.27	-\$ 119,320,864.97	-\$ 11,520,505.81
	20	80	-\$ 48,832,509.41	-\$ 134,928,059.59	-\$ 97,890,512.37	-\$ 5,029,039.47
	50	50	-\$ 30,251,758.71	-\$ 95,829,037.57	-\$ 65,744,983.49	\$ 4,708,160.04
	100	0	\$ 716,159.13	-\$ 30,664,000.88	-\$ 12,169,102.01	\$ 20,936,825.88
4. Rendimiento: 17.79 Ton/ha, Cosechas al año: 3	0	100	-\$ 43,147,275.77	-\$ 142,921,673.50	-\$ 101,248,464.19	\$ 6,551,894.97
	20	80	-\$ 30,760,108.64	-\$ 116,855,658.82	-\$ 79,818,111.60	\$ 13,043,361.30
	50	50	-\$ 12,179,357.93	-\$ 77,756,636.80	-\$ 47,672,582.72	\$ 22,780,560.81
	100	0	\$ 18,788,559.90	-\$ 12,591,600.11	\$ 5,903,298.76	\$ 39,009,226.65

Se plantearon seis escenarios para un área de 1.6 ha, los cuales se pueden observar en la tabla 53. Se encontró que el bombeo solar fotovoltaico con baterías es factible en los

escenarios 4, 5 y 6, sólo si el agricultor no financia la deuda. Para el bombeo solar fotovoltaico sin baterías es factible en todos los escenarios, siempre y cuando el agricultor no financie la deuda. En el bombeo eléctrico es rentable en los escenarios 1 y 3 sólo si el agricultor no financia la deuda, en el escenario 2 y 5 si el inversionista paga el 50 y 100% de la deuda, en el escenario 4 es rentable si el agricultor paga el 20, el 50 y el 100% de la deuda, y en el escenario 6 resulta rentable en todos los casos; y en el bombeo hidráulico ROCHFER resulta rentable en todos los escenarios.

Tabla 53. Análisis de sensibilidad para un área de 1.6 ha

Parámetro	VPN						
	% Recursos propios	% Deudas	Bombeo eléctrico	Bombeo solar fotovoltaico con baterías	Bombeo solar fotovoltaico sin baterías	Bombeo hidráulico ROCHFER	
1. Rendimiento: 15.15 Ton/ha, Cosechas al año: 2	0	100	-\$ 43,243,131.02	-\$ 143,017,528.74	-\$ 101,344,319.44	\$ 6,456,039.72	
	20	80	-\$ 30,855,963.88	-\$ 116,951,514.07	-\$ 79,913,966.85	\$ 12,947,506.06	
	50	50	-\$ 12,275,213.18	-\$ 77,852,492.05	-\$ 47,768,437.96	\$ 22,684,705.56	
	100	0	\$ 18,692,704.66	-\$ 12,687,455.35	\$ 5,807,443.52	\$ 38,913,371.41	
2. Rendimiento: 15.15 Ton/ha, Cosechas al año: 3	0	100	-\$ 16,182,457.49	-\$ 143,017,528.74	-\$ 101,344,319.44	\$ 33,516,713.25	
	20	80	-\$ 3,795,290.35	-\$ 116,951,514.07	-\$ 79,913,966.85	\$ 40,008,179.59	
	50	50	\$ 14,785,460.35	-\$ 77,852,492.05	-\$ 47,768,437.96	\$ 49,745,379.10	
	100	0	\$ 45,753,378.19	-\$ 12,687,455.35	\$ 5,807,443.52	\$ 65,974,044.94	
3. Rendimiento: 16.5 Ton/ha, Cosechas al año: 2	0	100	-\$ 33,952,545.55	-\$ 133,726,943.28	-\$ 92,053,733.98	\$ 15,746,625.18	
	20	80	-\$ 21,565,378.42	-\$ 107,660,928.60	-\$ 70,623,381.39	\$ 22,238,091.52	
	50	50	-\$ 2,984,627.72	-\$ 68,561,906.58	-\$ 38,477,852.50	\$ 31,975,291.03	
	100	0	\$ 27,983,290.12	-\$ 3,396,869.89	\$ 15,098,028.98	\$ 48,203,956.87	
4. Rendimiento: 16.5 Ton/ha, Cosechas al año: 3	0	100	-\$ 2,246,579.29	-\$ 102,020,977.01	-\$ 60,347,767.71	\$ 47,452,591.45	
	20	80	\$ 10,140,587.85	-\$ 75,954,962.34	-\$ 38,917,415.12	\$ 53,944,057.79	
	50	50	\$ 28,721,338.55	-\$ 36,855,940.32	-\$ 6,771,886.23	\$ 63,681,257.29	
	100	0	\$ 59,689,256.39	\$ 28,309,096.37	\$ 46,803,995.25	\$ 79,909,923.14	
5. Rendimiento: 17.79 Ton/ha, Cosechas al año: 2	0	100	-\$ 25,074,875.00	-\$ 124,849,272.72	-\$ 83,176,063.42	\$ 24,624,295.74	
	20	80	-\$ 12,687,707.87	-\$ 98,783,258.05	-\$ 61,745,710.83	\$ 31,115,762.07	
	50	50	\$ 5,893,042.84	-\$ 59,684,236.03	-\$ 29,600,181.94	\$ 40,852,961.58	
	100	0	\$ 36,860,960.67	\$ 5,480,800.66	\$ 23,975,699.53	\$ 57,081,627.42	
6. Rendimiento: 17.79 Ton/ha, Cosechas al año: 3	0	100	\$ 11,069,926.54	-\$ 88,704,471.18	-\$ 47,031,261.88	\$ 60,769,097.28	
	20	80	\$ 23,457,093.68	-\$ 62,638,456.50	-\$ 25,600,909.29	\$ 67,260,563.62	
	50	50	\$ 42,037,844.38	-\$ 23,539,434.49	\$ 6,544,619.60	\$ 76,997,763.12	
	100	0	\$ 73,005,762.22	\$ 41,625,602.21	\$ 60,120,501.08	\$ 93,226,428.97	

- Análisis de resultados

Se realizó un aforo puntual para tener un caudal de base para el diseño de la obra hidráulica, debido a que no había datos mensuales de caudales del río Guabas en la zona de influencia del proyecto. Pero lo ideal para el diseño de estructuras hidráulicas es tener un registro multianual de caudales y niveles máximo, promedio y mínimo del río, para poder realizar la curva de calibración del tramo en estudio y determinar los niveles de permanencia con 75% del tiempo.

Según los datos obtenidos de rentabilidad financiera, los sistemas de bombeo solar fotovoltaico con y sin baterías no son factibles desde ese punto de vista, debido a que el VPN y la TIR son negativos, por ende no se va a generar el efectivo suficiente para cubrir la totalidad de la inversión. Igual caso sucede en el bombeo eléctrico, que solamente es factible cuando el agricultor cubra la totalidad de la inversión con recursos propios.

Por otro lado la inversión en el bombeo hidráulico ROCHFER no es rentable si el 100% de la deuda la financia Finagro, pero si es rentable si se financia el 80% de la deuda y el 20% lo aporta el agricultor, debido a que el VPN y TIR (\$ 6,385,108.39 y 12%) son positivos y mayores al de los otros sistemas de bombeo, lo cual implica que el proyecto será capaz de generar el efectivo necesario para recuperar la inversión y obtener ganancias.

Desde el punto de vista técnico los tres sistemas de bombeo resultan factibles, debido a que las bombas cumplen con la presión requerida y las tuberías soportan la presión máxima permisible por el fabricante con las velocidades recomendadas tanto para la tubería de succión menor a 1.5 m/s y de impulsión mayor a 1.5 m/s.

Desde el punto de vista técnico-económico el bombeo hidráulico mediante rueda ROCHFER resultó factible debido a que esta tecnología requiere baja inversión y costos de operación mínimos, lo cual hace atractivo y asequible este tipo de bombeo para el pequeño agricultor comparado con el bombeo eléctrico y solar.

Aunque el proyecto con ruedas hidráulicas ROCHFER sea factible, el inversionista siempre desea tener una mayor tasa interna de retorno, y para ello el gobierno debe incentivar económicamente a los pequeños agricultores a invertir en este tipo de proyectos con energía limpia, debido a que obtienen un ahorro en los costos de operación y mantenimiento de la bomba al no utilizar combustibles fósiles ya que el diesel y la gasolina cada día están incrementando de precio y además contribuyen con el medio ambiente al no emitir GEI.

Uno de los mayores inconvenientes del bombeo solar para el sector agrícola en Colombia, es el costo de adquisición de los equipos, ya que este es un país distribuidor y no productor. Por otro lado para que un proyecto de bombeo con energía solar fotovoltaica resulte factible, va depender principalmente de las condiciones climáticas de la zona y de la demanda energética, en lugares soleados la generación de energía será mayor que en lugares nublados por lo cual el sistema lo ideal es instalar paneles solares en zonas con bastante radiación solar para que se empleen la menor cantidad de componentes solares y el sistema no sea tan costoso.

Comparando económicamente entre los sistemas de bombeo solar con y sin baterías, el incremento aproximadamente es del 21% en el bombeo solar con batería, el cual es un porcentaje alto para un pequeño agricultor que desea y espera ganar más de lo que está invirtiendo; y es por ello que en sitios donde la energía eléctrica es económica como en la zona rural no es beneficioso invertir en esta tecnología, a menos de que no haya presencia de red eléctrica, la cual si sería una solución en la generación de energía eléctrica.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

1. El presente trabajo de investigación logró demostrar, mediante un análisis técnico-financiero, que la alternativa para solucionar el déficit de agua en el predio Asociación Finca es el bombeo hidráulico mediante ruedas ROCHFER, debido a que las presiones requeridas por la tubería y bomba son aceptables y están por debajo de lo máximo permisible por los fabricantes. El VPN siempre fue positivo en los cuatro escenarios planteados y, además, el bombeo con ruedas ROCHFER es una inversión baja (\$41'535.649) comparada con el bombeo eléctrico (\$79'259.292), solar sin baterías (\$137'122.117) y solar con baterías (\$166'783.403).
2. El bombeo eléctrico resulta rentable comparado con el bombeo solar fotovoltaico debido a que en la vereda de Betania el precio de la energía es económica; por lo tanto, no se justifica una alta inversión en equipos de bombeo solar teniendo la posibilidad de utilizar energía eléctrica a bajo precio. Caso contrario sería si la energía eléctrica tuviera un alto precio y la inversión del bombeo solar se compensara con la reducción en los costos de operación y mantenimiento del sistema pero en el caso de Betania no resulta así.
3. El bombeo solar fotovoltaico, tanto con baterías como sin ellas no resulta rentable debido a la alta inversión inicial que se debe realizar y por el bajo precio de la energía eléctrica en Betania; aunque esta alternativa presenta ventajas en cuanto al número de impacto ambiental comparado con las alternativas que usan fuentes de combustibles fósiles, y los bajos costos de operación y mantenimiento, la limitante siempre será el alto coste de los componentes solares.
4. El sistema de bombeo solar fotovoltaico sin baterías tiene menor inversión que el sistema solar con baterías, pero es dependiente de la radiación solar de la zona, es decir, si no hay suficiente radiación solar la generación de energía eléctrica será baja por lo cual la bomba estará trabajando por debajo de su eficiencia. El diseño planteado del bombeo solar con baterías se incrementó en un 21% la inversión, pero garantiza que habrá energía eléctrica con dos días de autonomía. Algunas variables importantes en el dimensionamiento de un sistema solar fotovoltaico autónomo son los días de autonomía y la profundidad de descarga a la cual sea sometida la batería, debido a que estas dimensionan uno de los componentes más costosos como lo son las baterías.

8.2 RECOMENDACIONES

- Es necesaria una información topográfica detallada y datos climatológicos de la zona en estudio para la realización de los diseños de los sistemas de bombeo, de no tener esta información se hace casi imposible diseñar.
- Realizar el mantenimiento en todas las estructuras hidráulicas, como son la rejilla, la cámara de recolección, el desarenador, el pozo de succión, entre otras, ya que deben estar libres de obstrucción para un óptimo funcionamiento.

- La bomba eléctrica no se debe encender hasta que no haya sido cebada, ya que puede ocasionar daños en los cojinetes del motor. Cuando la bomba esté en marcha se debe verificar que los accesorios en la línea de succión e impulsión estén bien conectados y no presenten fugas. La frecuencia de arranques y paradas del motor debe ser de máximo 40 arranques por hora.
- Llevar un registro de lecturas de presión en la tubería de impulsión y caudal de operación, amperaje y voltaje del motor. Se debe operar la bomba con caudales entre 5 y 6 lps para obtener su máxima eficiencia y no debe superar los 7 lps para evitar la cavitación.
- El bombeo solar fotovoltaico es recomendable utilizarlo donde no haya cobertura de red eléctrica o en zonas donde el costo de la energía eléctrica es elevado. De implementar paneles solares se deben evitar sombras generadas por zonas verdes u otros, debido a que estos son muy sensibles a obstáculos, afectando su eficiencia, disminuyendo la potencia entregada al consumidor; por ende, es importante remover rápidamente estos obstáculos para una correcta generación de energía eléctrica.
- En el bombeo con rueda hidráulica ROCHFER para la instalación del conjunto rueda-bomba y fijación de los pernos en el soporte se debe utilizar un nivel de agua para la nivelación de la bomba, tanto en sentido perpendicular como paralelo a la rueda, para un correcto montaje.
- Usar cinta teflón para el sellado de los accesorios en la tubería de succión e impulsión y evitar en lo posible apretarlos bruscamente, la tubería de impulsión debe ir soldada y enterrada a una profundidad entre 30-50 cm y se debe tapar después de colocar en marcha el sistema.
- Incentivar a los estudiantes de ingeniería agrícola en la investigación de fuentes de energías renovables como una solución a la generación de energía limpia, la importancia de conocer las ventajas, desventajas y aplicaciones para el campo agro, para obtener un mayor crecimiento y un óptimo aprovechamiento de los recursos naturales.

BIBLIOGRAFÍA

- Bridgewater, A. (2009). *Energías alternativas handbok*. Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A.
- Campana, P. E., Li, H., & Yan, J. (2015). Techno-economic feasibility of the irrigation system for the grassland and farmland conservation in China : Photovoltaic vs. wind power water pumping, 103, 311–320.
- Campos Aranda, D. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. México: Universidad de San Luis Potosí.
- CAP. (2014). “Amanecer Solar CAP”, la planta fotovoltaica más grande de Latinoamérica ya es una realidad. Visitado el 25 de Septiembre de 2015, Recuperado de <http://www.cap.cl/amanecer-solar-cap-la-planta-fotovoltaica-mas-grande-de-latinoamerica-ya-es-una-realidad/>
- CEPIS. (2005). *Guías para el Diseño de Estaciones de Bombeo de Agua Potable*. Organización Panamericana de La Salud, 39.
- Chandel, S. S., Naik, M. N., & Chandel, R. (2015). Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies, 49, 1084–1099.
- Corcho, F., & Duque, J. (1997). *Acueductos: teoría y diseño* (2nd ed.). Medellín: Departamento de Publicaciones Universidad de Medellín.
- Diario Ecología. (2014). [VIDEO] La planta de energía solar más grande del mundo ya está operando. Visitado el 25 de Septiembre de 2015, Recuperado de http://diarioecologia.com/video-la-planta-de-energia-solar-mas-grande-del-mundo-ya-esta-operando-te-la-mostramos/?doing_wp_cron=1443016691.7015810012817382812500
- Eliseo, S. (2013). *Calcular cables conductores para paneles fotovoltaicos*. Retrieved April 28, 2017, from <http://eliseosebastian.com/calcular-cables-conductores-para-paneles-fotovoltaicos-1/>
- Enciso, J., & Mecke, M. (2004). *Utilizando energía renovable para bombear agua*. Cooperativa de Texas EXTENSIÓN.
- FAO. (2005). *Formulación y análisis detallado de proyectos. Un Enfoque Participativo Para La Identificación Y Preparación de Inversiones Rurales a Pequeña Escala*, Roma, Italia. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/008/a0323s/a0323s00.htm#Contents>
- García, M. (1999). *Energía solar fotovoltaica y cooperación al desarrollo*. Madrid: IEPALA Editorial.
- Godoy, J. (2001). *Bombeo a base de ruedas hidráulicas*. Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible Y Salud Ambiental, 1–15.
- Grundfos. (n.d.). *Installation and operating instructions*. Copyright Grundfos Holding.

Guevara, J. (2003). Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos. Publicaciones de La Universidad Central de Venezuela. Caracas.

Hidrostal. (2011). CONCEPTOS BASICOS BOMBAS CENTRÍFUGAS. Visitado el 24 de Noviembre de 2015, Recuperado de <http://es.slideshare.net/mecanicadefluidos/bombas-centrifugas-7934169>

Hybrytec. (2011). Proyecto Aguachica - Cesar, Bombeo de Agua. Cesar.

IDEAM. (2016). Valores totales mensuales de brillo solar (Horas), Estación: 26095080 TENERIFE, Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/solicitud-informacion>

ISO 748. (1997). Measurement of liquid flow in open channels. Velocity Area Methods.

Kaku, M., & Trainer, J. (1986). La Energía Nuclear (1st ed.). Barcelona: Gedisa.

Khader, B. (2003). La dependencia energética europea del mundo árabe. Alternativas Sur, 61–68.

Krochin, S. (1978). DISEÑO HIDRÁULICO (Segunda ed).

Lau, C., Jarvis, A., & Ramirez, J. (2013). Agricultura Colombiana : Adaptación al Cambio Climático. CIAT Políticas En Síntesis, Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia, 1, 4.

López de Ponce, A. (2014). Necesidades energéticas y propuesta de instalaciones solares. Málaga: IC Editorial.

López, R. (1995). ELEMENTOS DE DISEÑO PARA ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS (ESCUELA CO). Bogotá.

López-Luque, R., Reca, J., & Martínez, J. (2015). Optimal design of a standalone direct pumping photovoltaic system for deficit irrigation of olive orchards, 149, 13–23.

Méndez, J. (2011). Energía Solar Fotovoltaica. Agencia Insular de energía de Tenerife (Séptima). Madrid: FUNDACIÓN CONFEMETAL.

Moro, M. (2010). Instalaciones solares fotovoltaicas. Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A.

Naranjo, S. (2012). Hace 20 años Colombia sufrió el apagón. El colombiano. Envigado. Recuperado:http://www.elcolombiano.com/hace_20_anos_colombia_sufrió_el_apagon-JVEC_180119

PAVCO (nd.). Manual técnico Tubosistemas PREESIÓN PVC. Mexichem soluciones integrales.

Ramírez et al., C. (2005). Manual de procedimientos hidrometricos (XIII). Cali, Colombia.

Redagrícola. (2013). Bombeo fotovoltaico campesino: Energía alternativa no convencional para riego. Visitado el 26 de Septiembre de 2015, Recuperado de

<http://www.redagricola.com/reportajes/riego/bombeo-fotovoltaiico-campesinoenergia-alternativa-no-convencional-para-riego>

REGAR. (2014). Determinación de la Demanda Hídrica en cultivos de Ají Tabasco, Cúrcuma y Zapallo. Universidad Del Valle, 1–21.

Restrepo, H. (2016). GLOBALEM.

ROCHFER, M. I. (2015). ROCHFER diferencial. Visitado el 16 de Mayo de 2015, Visitado el <http://www.ROCHFER.com.br/index.php/component/content/article/12-produtos/39-diferenciais-ROCHFER>

Roldán, J. (2008). Fuentes de Energía. Madrid: Cengage Learning Paraninfo, S.A.

Roldán, J. (2013). Energías renovables, lo que hay que saber. Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A.

Salas, A. F., & Urrestarazu, L. P. (2008). Grupos de bombeo. Visitado el 14 de Enero de 2016, Recuperado de [http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema 7. Bombas/tutorial_04.htm](http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%207.%20Bombas/tutorial_04.htm)

Sánchez, U. (2012). Máquinas hidráulicas. Alicante: Editorial Club Universitario.

Secretaria de Agricultura. (2014). Guía de Costos Agrícolas.

UPME. (2014). Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica 2013-2017. Colombia: Strategy Ltda.

Vázquez, J. (2010). Los inventos de La Habana. Visitado el 15 de Mayo de 2015, Recuperado de <http://allumar.blogspot.com/p/los-inventos.html>

Zuluaga, O. (2014). EPSA puso en operación el laboratorio solar más grande de Colombia. Comunicado de Prensa - EPSA, 1.

**ANEXO 1. REGISTROS MULTIANUALES DE BRILLO SOLAR (EST.
TENERIFE)**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1972	175.5	137.6	119.6	141.4	121.6	152.1	181.1	146.1	126.4	131.2	106.9	165.8
1973	166.8	179.9	121.9	97.4	54.9	74.2	96.2	109.5	89.3	81.4	71.6	98
1974	117.9	88.5	98.2	112.2	130.9	96.3	125.1	117.8	97.6	95.1	87.7	148.9
1975	183.3	85.6	96.7	112.5	83	86	113	90.2	97.2	77.1	58.2	79.1
1977	209	125.5	145.4	91.1	114.8	121.4	139.9	149.8	131.2	118.9	113.4	140.6
1978	186.1	158.2	132.6	80.7	114.3	124.7	146.3	152.2	74.1	131.9	134.6	144.5
1979	166	166.8	123.7	71.2	109.9	90	103.5	95.4	112.2	78.1	77.7	149.2
1980	138.8	142.1	175.1	119.3	139.8	132.4	174.8	132.1	121.2	101.4	112.7	126.4
1981	195.3	117.1	125.2	78.7	92.5	111.9	165.3	150.4	137.2	94.2	92.7	136.3
1982	152.6	96.8	109.7	80.3	89.8	150.1	129.9	156.1	91.9	88.2	104.4	113.4
1983	154.7	134.3	104.8	79.8	126.5	131.8	146.4	134.5	128.8	116	107.2	108.8
1985	144.9	175.1	173.8	133.8	126.9	150.5	126.3	116.3	109.1	108.8	125.6	160.2
1986	158.4	119.2	120	108.1	133.8	107.7	162.7	165.7	152	77.1	122.2	156.4
1987	140.2	110	105.7	79.1	139.4	154.7	123.1	151.6	148.4	92.7	130.3	172.6
1988	175	139.8	199.6	84.5	105.2	113.3	139.6	115.4	100.9	122.8	82.9	112.2
1989	140.6	114.1	124.1	107.4	112.4	122.7	156.1	151.6	123.4	112.3	117	154.3
1990	180.6	93.8	115.5	89.2	104.5	136.8	149.5	154.3	146.7	80.7	132.2	144.4
1991	198.1	160.2	126.1	125.8	99.5	121.2	111.4	123.6	118.9	150.8	89.8	144.3
1992	172.3	134.2	159.5	109.6	97	150.8	115.2	122.4	117	109.6	103.2	149.6
1993	165.2	146.6	88.8	74.4	83	117.3	136.1	148.8	94.8	126.6	72.5	143
1994	147.1	101.1	101.6	93.8	97.1	129.1	147.9	149.8	116.6	115.7	112.6	152.1
1995	201	194.3	130.7	101.6	106.3	107.3	109.2	114.6	140	116	122.8	128.8
1996	134.8	126	102.1	102.3	91.3	103.7	126.4	136.5	141.8	86.6	122.2	126.8
1997	105.8	125.9	134.2	96.1	102.4	129.2	139.1	164.7	105.3	99.3	100.6	173.3
1998	223.2	126.6	118.6	93	88.3	145.9	130.8	99.2	117.8	125.5	103.9	119.8
1999	105.9	63.2	102.1	61.5	105.3	107.9	146.9	116.7	65	97.7	106.6	90.5
2000	109.4	104.1	100.6	77.9	80.2	127.2	130.9	151.6	90.5	109.7	84.9	105.9
2001	177.9	133.7	111.5	135.2	94.4	90.5	104.1	101.7	83.3	157.3	85.8	110.5
2002	184.5	149.9	132.9	94.1	112.3	114.2	156.2	158.4	138.8	115.9	108	135
2003	219.7	117.9	124.7	89.5	109.3	102.6	141.6	157.1	98.3	92.3	105.1	123.3
2004	161.9	152.7	149.7	99.2	93.8	130.7	110.6	133.5	99.4	89.3	92	115.7
2005	138.3	139	98.6	73.3	89.1	85.4	147.7	116.9	120.8	94.6	76.2	99.2
2006	116.1	115.8	82	69.5	94.9	103.2	125.3	150.9	133.6	108	82.4	105.3
2007	181.4	191.1	88.7	76	87.8	92.5	106.4	104	129.4	98.5	101.1	74.9
2008	131.1	122.3	95.8	107.4	89.5	101.5	121.2	110.4	116.6	64.8	42.7	66.2
2009	87.5	94.4	91.9	62.4	41.1	82	55.3	54	44.3	41.7	39.6	116.4
2010	92.2	138.4	135.9	75.5	88.4	97.4	75.7	73.9	72.5	67	54.2	56.8
2011	130.2	62.4	61.3	67.4	70.2	109.1	131.6	133.8	104.2	73.9	69.9	74.4
2012	96	107.5	108.1	67.8	73.4	121.9	137.5	141.6	138.8	102.4	70.6	91.8
2013	54.3	42.6	40.9	30.6	33.1	121.8	132.3	94.8	35.7	33.6	31.9	81.7
2014	125.1	86	76	109.3	98.7	121.7	182.9	117.6	116.6	70.2	82.8	94.3
2015	74.6	131.3	110.5	68.6	102.4	86	104.2	95	69.1	65.1	61.6	80.3

ANEXO 2. RELACIONES HIDRÁULICAS PARA CONDUCTOS CIRCULARES

Q/Q _o	Rel.	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	V/V _o	0.000	0.292	0.362	0.400	0.427	0.453	0.473	0.492	0.505	0.520
	d/D	0.000	0.092	0.124	0.148	0.165	0.182	0.196	0.210	0.220	0.232
	R/R _o	0.000	0.239	0.315	0.370	0.410	0.449	0.481	0.510	0.530	0.554
0.1	V/V _o	0.540	0.553	0.570	0.580	0.590	0.600	0.613	0.624	0.634	0.645
	d/D	0.248	0.258	0.270	0.280	0.289	0.298	0.308	0.315	0.323	0.334
	R/R _o	0.586	0.606	0.630	0.650	0.668	0.686	0.704	0.716	0.729	0.748
0.2	V/V _o	0.656	0.664	0.672	0.680	0.687	0.695	0.700	0.706	0.713	0.720
	d/D	0.346	0.353	0.362	0.370	0.379	0.386	0.393	0.400	0.409	0.417
	R/R _o	0.768	0.780	0.795	0.809	0.824	0.836	0.848	0.860	0.874	0.886
0.3	V/V _o	0.729	0.732	0.740	0.750	0.755	0.760	0.768	0.776	0.781	0.787
	d/D	0.424	0.431	0.439	0.447	0.452	0.460	0.468	0.476	0.482	0.488
	R/R _o	0.896	0.907	0.919	0.931	0.938	0.950	0.962	0.974	0.983	0.992
0.4	V/V _o	0.796	0.802	0.806	0.810	0.816	0.822	0.830	0.834	0.840	0.845
	d/D	0.498	0.504	0.510	0.516	0.523	0.530	0.536	0.542	0.550	0.557
	R/R _o	1.007	1.014	1.021	1.028	1.035	1.043	1.050	1.056	1.065	1.073
0.5	V/V _o	0.850	0.855	0.860	0.865	0.870	0.875	0.880	0.885	0.890	0.895
	d/D	0.563	0.570	0.576	0.582	0.586	0.594	0.601	0.608	0.615	0.620
	R/R _o	1.079	1.087	1.094	1.100	1.107	1.113	1.121	1.125	1.129	1.132
0.6	V/V _o	0.900	0.903	0.908	0.913	0.918	0.922	0.927	0.931	0.936	0.941
	d/D	0.626	0.632	0.639	0.645	0.651	0.658	0.666	0.672	0.678	0.686
	R/R _o	0.136	1.139	1.143	1.147	1.151	1.155	1.160	1.163	1.167	1.172
0.7	V/V _o	0.945	0.951	0.955	0.958	0.961	0.965	0.969	0.972	0.975	0.980
	d/D	0.692	0.699	0.705	0.710	0.719	0.724	0.732	0.738	0.743	0.750
	R/R _o	1.175	1.179	1.182	1.184	1.188	1.190	1.193	1.195	1.197	1.200
0.8	V/V _o	0.984	0.987	0.990	0.993	0.997	1.001	1.005	1.007	1.011	1.015
	d/D	0.756	0.763	0.770	0.778	0.785	0.791	0.798	0.804	0.813	0.820
	R/R _o	1.202	1.205	1.208	1.211	1.214	1.216	1.219	1.219	1.215	1.214
0.9	V/V _o	1.018	1.021	1.024	1.027	1.030	1.033	1.036	1.038	1.039	1.040
	d/D	0.826	0.835	0.843	0.852	0.860	0.868	0.876	0.884	0.892	0.900
	R/R _o	1.212	1.210	1.207	1.204	1.202	1.200	1.197	1.195	1.192	1.190
1.0	V/V _o	1.041	1.042	1.042	1.042						
	d/D	0.914	0.920	0.931	0.942						
	R/R _o	1.172	1.164	1.150	1.136						

Número de Hazen (Vs/V_o)

Condiciones	Remoción (%)							
	87.5	80	75	70	65	60	55	50
n = 1	7.00	4.00	3.00	2.30	1.80	1.50	1.30	1.00
n = 3	2.75		1.66					0.76
n = 4	2.37		1.52					0.73
Máximo teórico	0.88		0.75					0.50

ANEXO 3. CALIBRE DEL ALAMBRE SEGÚN LA AWG

AWG	Diam. mm	Area mm2	AWG	Diam. mm	Area mm2
1	7.35	42.40	16	1.29	1.31
2	6.54	33.60	17	1.15	1.04
3	5.86	27.00	18	1.024	0.823
4	5.19	21.20	19	0.912	0.653
5	4.62	16.80	20	0.812	0.519
6	4.11	13.30	21	0.723	0.412
7	3.67	10.60	22	0.644	0.325
8	3.26	8.35	23	0.573	0.259
9	2.91	6.62	24	0.511	0.205
10	2.59	5.27	25	0.455	0.163
11	2.30	4.15	26	0.405	0.128
12	2.05	3.31	27	0.361	0.102
13	1.83	2.63	28	0.321	0.0804
14	1.63	2.08	29	0.286	0.0646
15	1.45	1.65	30	0.255	0.0503

ANEXO 4. REGISTRO DEL AFORO REALIZADO EN EL RÍO GUABAS

Vertical	Ancho (m)	Profundidad (m)	Prof. Mol (m)	Conteo Inicial	Conteo final	Diferencia	Tiempo (s)	Distancia (m)	Velocidad (m/s)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.2	0.07	sup	0	0	0	0	0	0
2	0.5	0.09	sup	0	0	0	0	0	0
3	0.5	0.11	sup	2218	3242	1024	60	27.52	0.46
3	0.5	0.11	sup	22380	23276	896	59.62	24.08	0.4
3 prom	-	-	-	-	-	-	-	-	0.43
4	0.5	0.27	0.16	3242	4213	971	59.56	26.09	0.44
5	0.5	0.35	0.21	4213	5933	1720	59.23	46.22	0.78
5	0.5	0.35	0.21	23276	25061	1785	60.19	47.97	0.8
5 prom	-	-	-	-	-	-	-	-	0.67
6	0.5	0.5	0.3	6700	7273	573	59.72	15.4	0.26
6	0.5	0.5	0.3	7273	7990	717	59.72	19.27	0.32
6 sup	0.5	0.5	0.3	7990	9551	1561	60	41.95	0.7
6 prom	-	-	-	-	-	-	-	-	0.43
7	0.5	0.57	0.34	9551	11557	2006	60	53.91	0.9
7	0.5	0.57	0.34	25061	27371	2310	60	62.08	1.03
7 sup	0.5	0.57	0.34	11557	14235	2678	60	71.97	1.2
7 sup	0.5	0.57	0.34	27371	30072	2701	60	72.58	1.21
7 prom	-	-	-	-	-	-	-	-	1.09
8	0.5	0.48	0.29	14235	14908	673	60.01	18.09	0.3
8 sup	0.5	0.48	0.29	14908	17233	2325	60	62.48	1.04
8 prom	-	-	-	-	-	-	-	-	0.67
9	0.5	0.38	0.23	17233	18320	1087	59.43	29.21	0.49
9	0.5	0.38	0.23	30072	31322	1250	59.84	33.59	0.56
9 sup	0.5	0.38	0.23	18320	20527	2207	60	59.31	0.99
9 sup	0.5	0.38	0.23	31322	33461	2139	61.72	57.48	0.93
9 prom	-	-	-	-	-	-	-	-	0.74
10	0.5	0.23	0.14	20527	22039	1512	59.82	40.63	0.68
11	0.5	0.19	0.11	22039	22374	335	60	9	0.15
11	0.5	0.19	0.11	33461	34195	734	60.32	19.72	0.33
11 prom	-	-	-	-	-	-	-	-	0.39
12	0.5	0.09	sup	0	0	0	0	0	0
13	0.5	0.04	sup	0	0	0	0	0	0
14	0.2	0	sup	0	0	0	0	0	0

Datos promedios

Datos descartados

sup: superficial

prom: promedio

ANEXO 5. FICHA TÉCNICA DEL PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO

Electrical Characteristics @STC*

MODEL	UP-M265P	UP-M270P	UP-M275P	UP-M280P	UP-M285P
Max Power Pm (Wp)	265	270	275	280	285
Max Power Voltage Vm (V)	31.2	31.4	31.6	31.8	32.0
Max Power Current Im (A)	8.49	8.60	8.70	8.81	8.91
Open-Circuit Voltage Voc (V)	38.5	38.6	38.7	38.9	39.0
Short-Circuit Current Isc (A)	8.78	8.88	8.98	9.09	9.20
Module Efficiency	16.3%	16.6%	16.9%	17.2%	17.5%
Maximum System Voltage (V)	1000(IEC)/1000(UL)				
Power Tolerance	0/+3%				
Series Fuse Rating (A)	20A				

STC: Irradiance 1000 W/m², Module temperature 25°C, AM=1.5

Components & Mechanical Data

Front Glass	High Transparency Tempered Glass 0.125" // 3.2 mm
Junction Box	IP 65 or above
Bypass Diode	3 diodes
Output Cables	1.0 m // IEC, UL approved (4 mm ² , 12AWG) (PV Wire Type)
Connectors	MC4 compatible (IP67, IEC and UL approved)
Frame	Anodized aluminium alloy type 6063-T5
Encapsulation Material	EVA (0.018" // 0.45 mm ± 0.001" // 0.03 mm thickness)
Back Sheet	White multilayer polymer film
Temperature Range	-40°F to +194°F // -40°C to +90°C
Max Load	75 lbs / ft ² (UL Standard) // 5400 Pa (IEC Standard)
Impact Resistance	Steel ball - 1.18 lbs // 535 g dropped from 51" // 1.3 m high

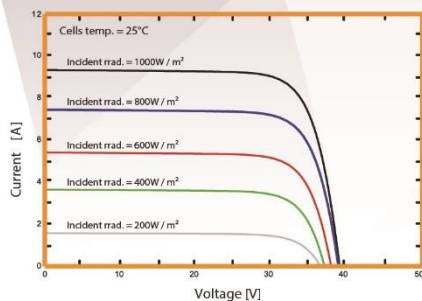
Specifications

Cells	Polycrystalline silicon solar cells 6" x 6" // 156 mm x 156 mm
Number of Cells	60 (6 x 10)
Dimensions (in // mm)	64.57 x 39.06 x 1.38 // 1640 x 992 x 35
Weight (lb // kg)	40.8 // 18.5

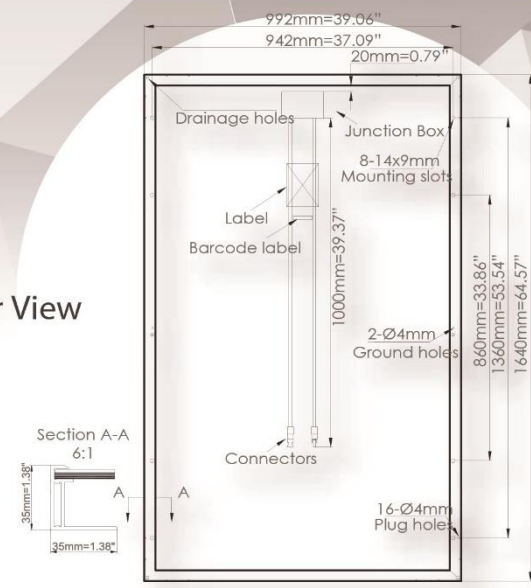
Temperature Coefficients

NOCT (°C)	45 ± 2
Temperature Coefficients of Isc (% / °C)	0.05 ± 0.01
Temperature Coefficients of Voc (% / °C)	-0.30 ± 0.02
Temperature Coefficients of Im (% / °C)	-0.02 ± 0.02
Temperature Coefficients of Vm (% / °C)	-0.42 ± 0.03
Temperature Coefficients of Pm (% / °C)	-0.43 ± 0.05

IV Curves



Rear View



Options Available

SolarEdge Integrated
Tigo Integrated

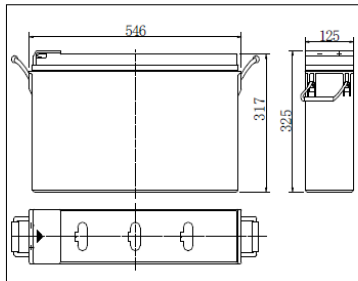
ANEXO 6. FICHA TÉCNICA DEL BATERÍA VRLA EN GEL



MT122050FT (12V205AH)

Valve Regulated Lead Acid Battery

MT122050FT
12 volts 205Ah



Specification

MT122050FT having its design life of 12 years @ 20 degree Celsius for floating

application and around 1200 cycles for 30% depth of discharge for cyclic application.

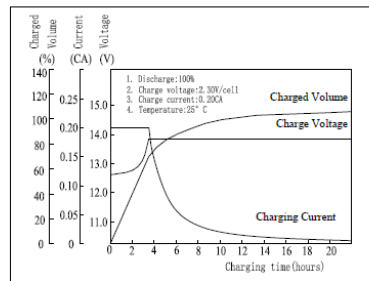
As our product were all rechargeable , highly efficient, maintenance free & leakage proof usable in all positions and it meets the standards of JISC, BS, DIN, IEC etc.

We're ISO9001certified &UL approved as well as CE

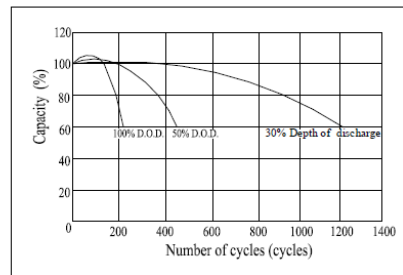
Our containers were all ABS resin and grades were : UL94-HB, UL94V-0 &

Nominal voltage	12 volts
Capacity	205 ampere hours @20°C, 10 hours rated (cut off voltage 1.80V/cell)
Dimension	L: 546 mm W: 125 mm H: 317 mm TH: 325 mm
Weight approx.	57 kg or 125.7 pounds
Internal resistance	Approx. 3.1 mΩ
Self-discharge rate	Approx. 3% per month @ 25 degree Celsius
Operation temperature range	Discharged: -15 to 50 degree Celsius (5 to 122 degree F)
	Charging: 5 to 35 degree Celsius (41 to 95 degree F)
	Storage: 0 degree to 40 degree Celsius (32 to 104 degree F)
Floating charge voltage	13.50 to 13.80 volts (-15mv / degree Celsius)
Cyclic charging voltage	14.50 to 14.90 volts (-20mv / degree Celsius)
Maximum charging current	61.5 ampere (A)
Boost/equalizing charge	Not required
Terminal type	Copper
Container material	General ABS resin

Charging Characteristics(25°C)



Cycle Life(25°C)



Constant Current Discharge Characteristics (A, 25°C)

F.V/TIME	5min	10min	15min	30min	60min	3h	5h	10h	20h
9.60V	648	432	339	213	129	52.3	37.7	20.8	11.0
10.20V	615	410	326	204	123	51.5	37.1	20.6	10.9
10.80V	577	384	309	194	117	50.5	36.4	20.5	10.9

Constant Power Discharge Characteristics (Watt, 25°C)

F.V/TIME	5min	10min	15min	30min	60min	3h	5h	10h	20h
9.60V	6814	4672	3732	2401	1474	614	445	249	132
10.20V	6465	4437	3581	2298	1409	605	438	247	131
10.80V	6068	4154	3393	2182	1343	593	429	247	131

ANEXO 7. FICHA TÉCNICA DEL CONTROLADOR MPPT

FLEXmax 60/80 SPECIFICATIONS

Models [*] :	FLEXmax 80 (FM80-150VDC)	FLEXmax 60 (FM60-150VDC)
Nominal Battery Voltages	12, 24, 36, 48, or 60VDC (Single model, selectable via field programming at start-up)	12, 24, 36, 48, or 60VDC (Single model, selectable via field programming at start-up)
Maximum Output Current	80A @ 104°F (40°C) with adjustable current limit	60A @ 104°F (40°C) with adjustable current limit
NEC Recommended Solar Maximum Array STC Nameplate	12VDC systems: 1000W / 24VDC systems: 2000W 48VDC systems: 4000W / 60VDC systems: 5000W	12VDC systems: 750W / 24VDC systems: 1500W 48VDC systems: 3000W / 60VDC systems: 3750W
PV Open Circuit Voltage (VOC)	150VDC absolute maximum coldest conditions / 145VDC start-up and operating maximum	150VDC absolute maximum coldest conditions / 145VDC start-up and operating maximum
Standby Power Consumption	Less than 1W typical	Less than 1W typical
Power Conversion Efficiency	97.5% @ 80ADC in a 48VDC System (typical)	98.1% @ 60ADC in a 48VDC System (typical)
Peak Efficiency	60VDC input w/48V battery at 53.1VDC (98.44%)	68VDC input w/48V battery at 52.8VDC (98.31%)
Charging Regulation	Bulk, absorption, float, silent and equalization	Bulk, absorption, float, silent and equalization
Voltage Regulation Set points	13 to 80VDC user adjustable with password protection	13 to 80VDC user adjustable with password protection
Equalization Charging	Programmable voltage setpoint and duration, automatic termination when completed	Programmable voltage setpoint and duration, automatic termination when completed
Battery Temperature Compensation	Automatic with optional RTS installed / 5.0mV per °C per 2V battery cell	Automatic with optional RTS installed / 5.0mV per °C per 2V battery cell
Voltage Step-Down Capability	Down convert from any acceptable array voltage to any battery voltage. Example: 72VDC array to 24VDC battery; 60VDC array to 48VDC battery	
Programmable Auxiliary Control Output	12VDC output signal which can be programmed for different control applications (maximum of 0.2ADC)	
Status Display	3.1" (8 cm) backlit LCD screen, 4 lines with 80 alphanumeric characters total	3.1" (8 cm) backlit LCD screen, 4 lines with 80 alphanumeric characters total
Remote Display and Controller	Optional MATE3, MATE or MATE2	Optional MATE3, MATE or MATE2
Network Cabling	Proprietary network system using RJ-45 modular connectors with CAT5 cable (8 wires)	Proprietary network system using RJ-45 modular connectors with CAT5 cable (8 wires)
Data Logging	Last 128 days of operation: amp-hours, watt-hours, time in float, peak watts, amps, solar array voltage, maximum battery voltage, min. battery voltage and absorb time, accumulated amp-hours, and kWh of production	
Operating Temperature Range	-40 to 60°C (power automatically derated above 40°C)	-40 to 60°C (power automatically derated above 40°C)
Environmental Rating	Indoor Type 1	Indoor Type 1
Conduit Knockouts	One 1" (25.4mm) on the back; One 1" (25.4mm) on the left side; Two 1" (25.4mm) on the bottom	One 1" (25.4mm) on the back; One 1" (25.4mm) on the left side; Two 1" (25.4mm) on the bottom
Warranty	Standard 5-year / Available 10-year	Standard 5-year / Available 10-year
Weight (lb/kg)	Unit: 12.20 / 5.53 Shipping: 15.5 / 7	Unit: 11.65 / 5.3 Shipping: 14.9 / 6.8
Dimensions H x W x D (in/cm)	Unit: 16.25 x 5.75 x 4.5 / 41.3 x 14.6 x 11.4 Shipping: 19 x 9.5 x 8.5 / 48.3 x 24.1 x 21.6	Unit: 13.75 x 5.75 x 4.5 / 35 x 14.6 x 11.4 Shipping: 17 x 9.5 x 8.5 / 43.2 x 24.1 x 21.6
Options	Remote Temperature Sensor (RTS), HUB4, HUB10.3, MATE, MATE2, MATE3	Remote Temperature Sensor (RTS), HUB4, HUB10.3, MATE, MATE2, MATE3
Menu Languages	English & Spanish	English & Spanish
Certifications	ETL Listed to UL1741, CSA C22.2 No. 107.1	ETL Listed to UL1741, CSA C22.2 No. 107.1

*Use appropriate wire size in accordance with NEC.

ANEXO 8. FICHA TÉCNICA DEL INVERSOR SOLAR

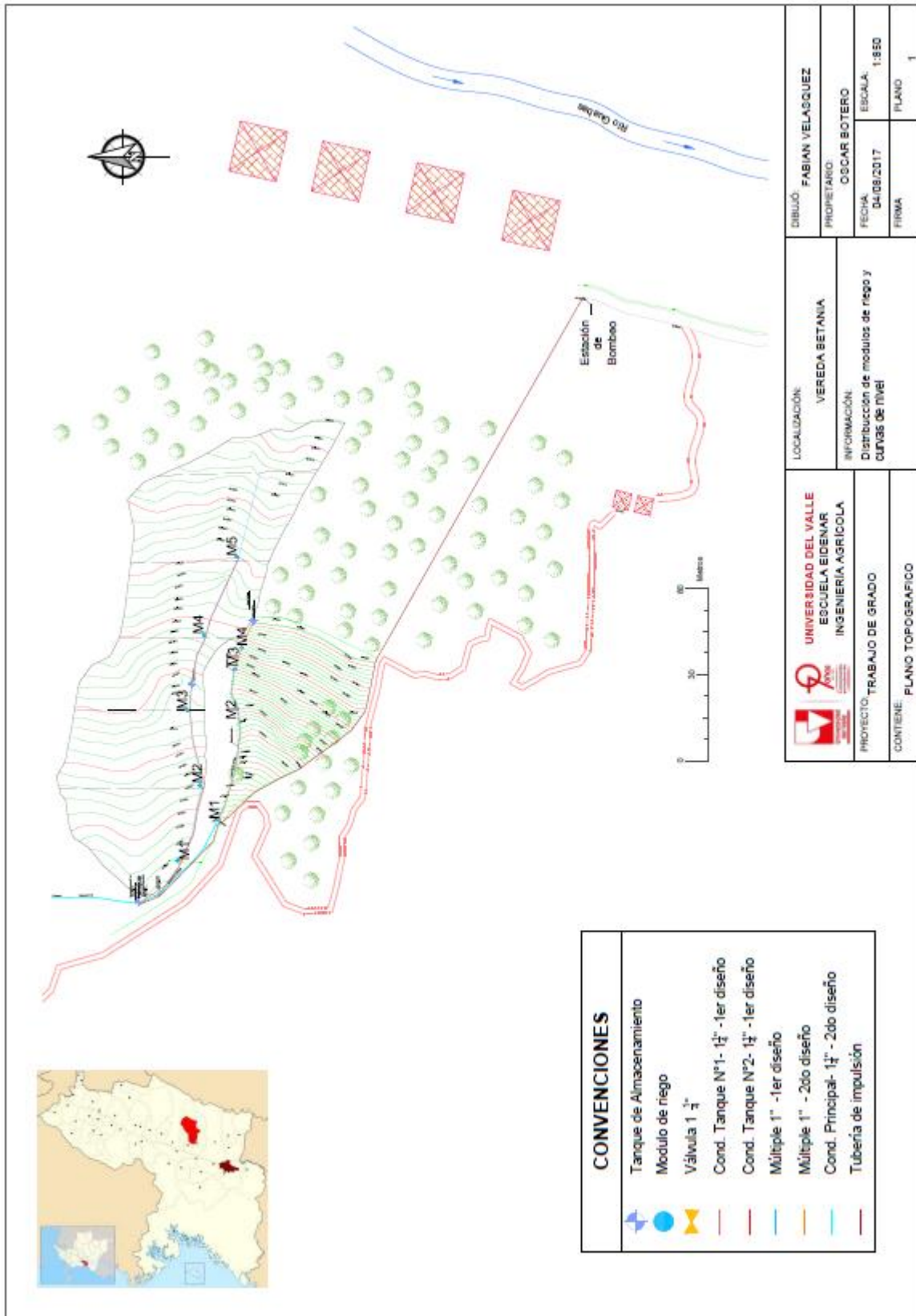
Three-Phase String Inverters 10 kW to 20 kW

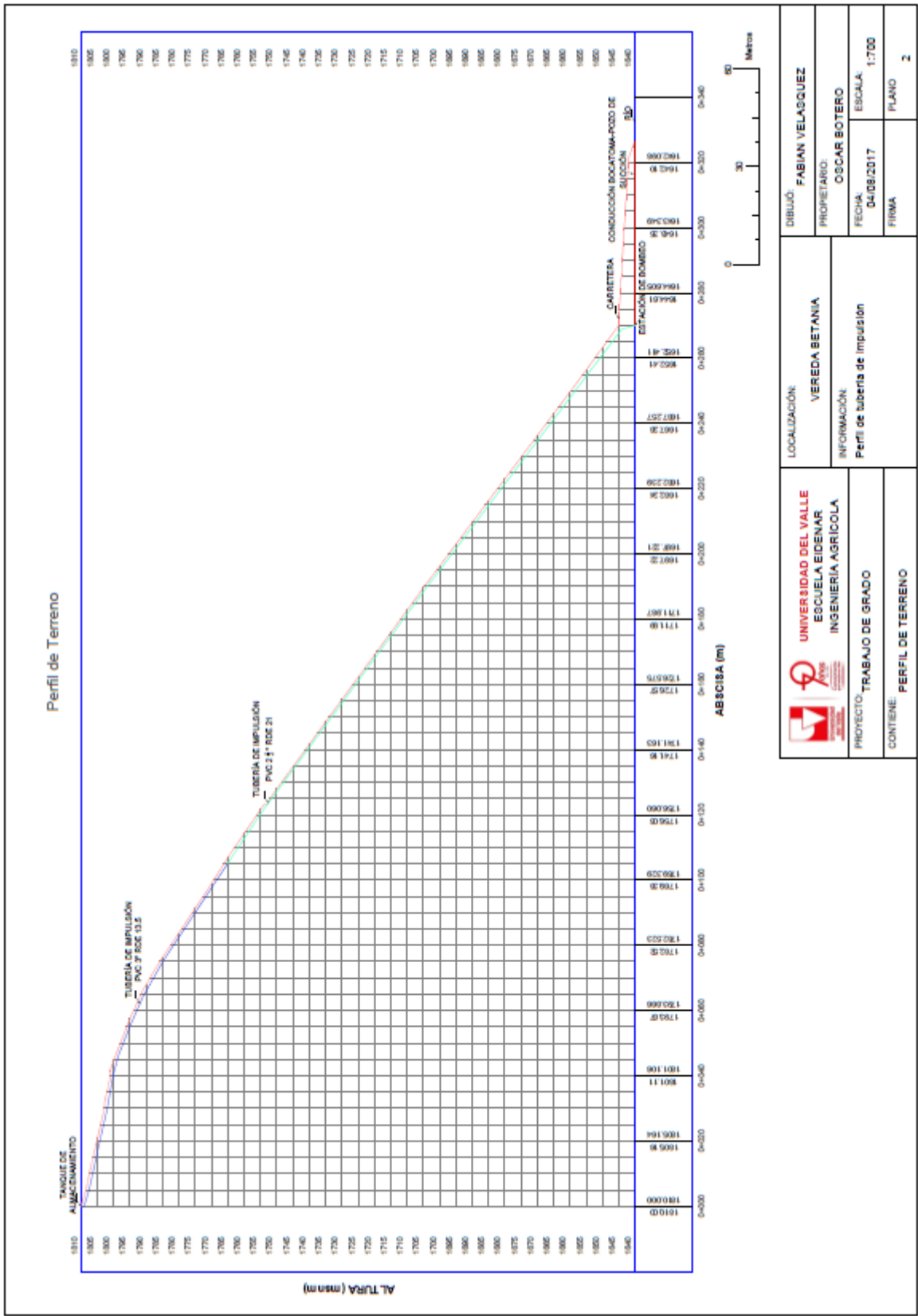
Technical data	Eversol TLC10K	Eversol TLC15K	Eversol TLC17K	Eversol TLC20K
Input (DC)				
Recommended max. PV array power (@cos=1) ¹⁾	14500W	21800W	24600W	29100W
DC Convertible power (@cos=1)	10400W	15600W	17600W	20800W
Suggested PV power ratio ¹⁾	80-140%			
Max. Input Voltage	1000V ²⁾			
MPP Voltage range/rated input voltage	270-900V/640V			
Min. Start voltage	250V			
Min. Feed-in power	12W			
Max. Input current per MPPT	22A/11A	22A/22A	22A/22A	22A/22A
Number of MPPTs	2	2	2	2
Number of independent MPP inputs	A:2, B:2	A:2, B:2	A:2, B:2	A:2, B:2
Output (AC)				
Rated active power	10000W	15000W	17000W	20000W
Max. Apparent AC power	10000VA	15000VA	17000VA	20000VA
Nominal AC voltage	3/N/PE220/380V,230/400V,240/415V			
Nominal AC voltage range	160-300V			
AC power frequency/range	50,60/±5Hz			
Rated power frequency/rated grid voltage	50Hz/230V			
Max. Output current	3 x 16A	3 x 24A	3 x 25.8A	3 x 30A
Power factor (@rated power)	> 0.99			
Adjustable displacement power factor ²⁾	0.85 inductive ... 0.85 capacitive			
Feed-in phases/connection phases	3/3			
Adjustable displacement power factor ²⁾	0.85 inductive ... 0.85 capacitive			
Feed-in phases/connection phases	3/3			
Harmonic distortion (THD) at rated output	< 3%			
Efficiency				
Max. Efficiency/European weighted efficiency	98.2%/97.8%	98.3%/97.9%		
MPPT Efficiency	99.50%	99.50%		
Protective devices				
DC Isolator	Optional			
PV Iso/Grid monitoring	Yes/Yes			
DC reverse polarity protection/AC short-circuit current capability/galvanically isolated	Yes/Yes/-			
GFCI function	Yes			
Protection class (according to IEC 62103)/overvoltage category (according to IEC 60664-1)	I/II (DC), III (AC)			
General data				
Dimensions (W/H/D)	500 x 758 x 175mm			
Weight	48kg			
Operating temperature range	-25°C...+60°C/13°F...+140°F			
Max. Operating altitude	2000m			
Noise emission (typical)	< 55 dB(A)@1m	< 60 dB(A)@1m		
Self-consumption (night)	< 1W			
Standby power (rated voltage)	< 12W			
Topology	Transformerless			
Cooling concept	Fan cooling			
Degree of protection (according to IEC 60529)	IP55 (fans), IP65 (others)			
Climatic category (according to IEC 60721-3-4)	4K4H			
Installation	Indoor&Outdoor			

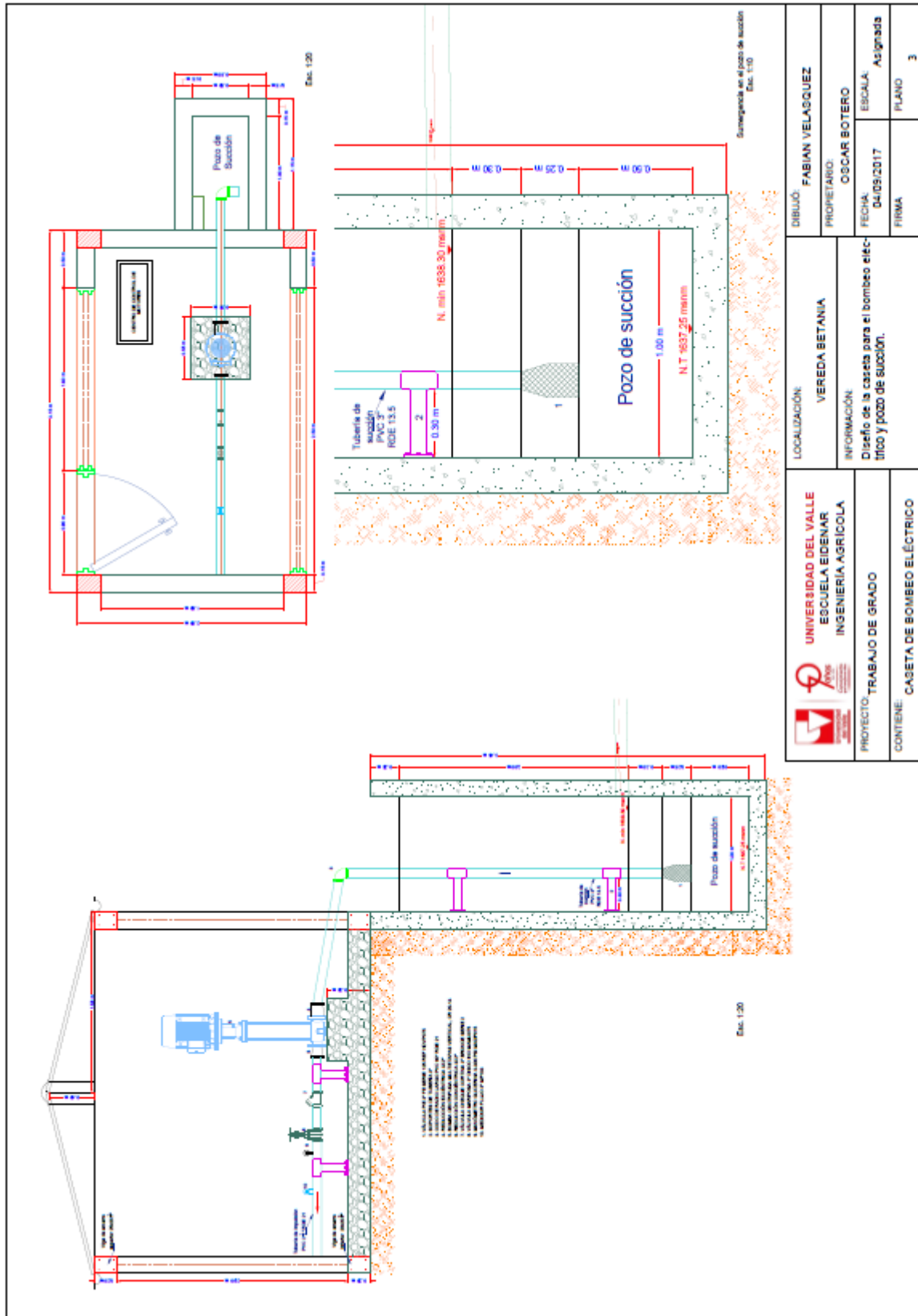
ANEXO 9. ANÁLISIS EN EL SISTEMA DE BOMBEO HIDRÁULICO ROCHFER

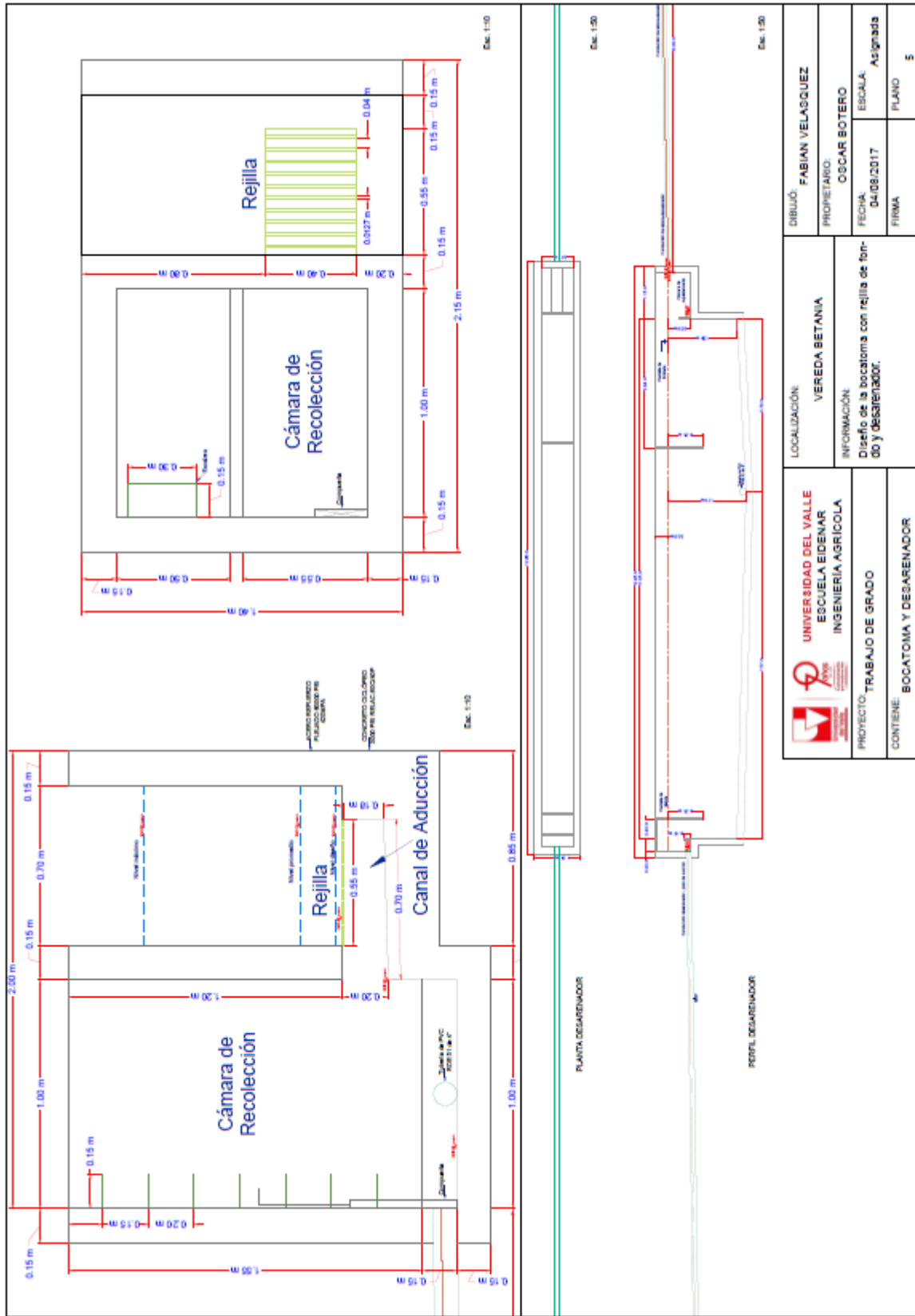
Parámetros		<u>d: 1/2", Pn=221.62, RDE:</u>		<u>d: 1/2", Pn=351.77, RDE:</u>	
		<u>13.5</u>		<u>9</u>	
Volumen (l/día)	HE (m)	HD (m)	Vel (m/s)	HD (m)	Vel (m/s)
5000	171.5	173.29	0.2	174.29	0.3
7000	171.5	174.84	0.3	176.7	0.4
9000	171.5	176.82	0.4	179.77	0.5
11000	171.5	179.21	0.5	183.49	0.6
13000	171.5	182.01	0.6	187.83	0.7
15000	171.5	185.19	0.7	192.78	0.8
17000	171.5	188.76	0.8	198.33	0.9
18360	171.5	191.4	0.8	202.43	1.0
19000	171.5	192.7	0.8	204.46	1.0
21000	171.5	197.01	0.9	211.16	1.1
23000	171.5	201.69	1.0	218.43	1.2
	< Presión Bomba	SI		SI	
CUMPLE	< Presión Tubería	SI		SI	
	Velocidad de Impulsión		NO		SI

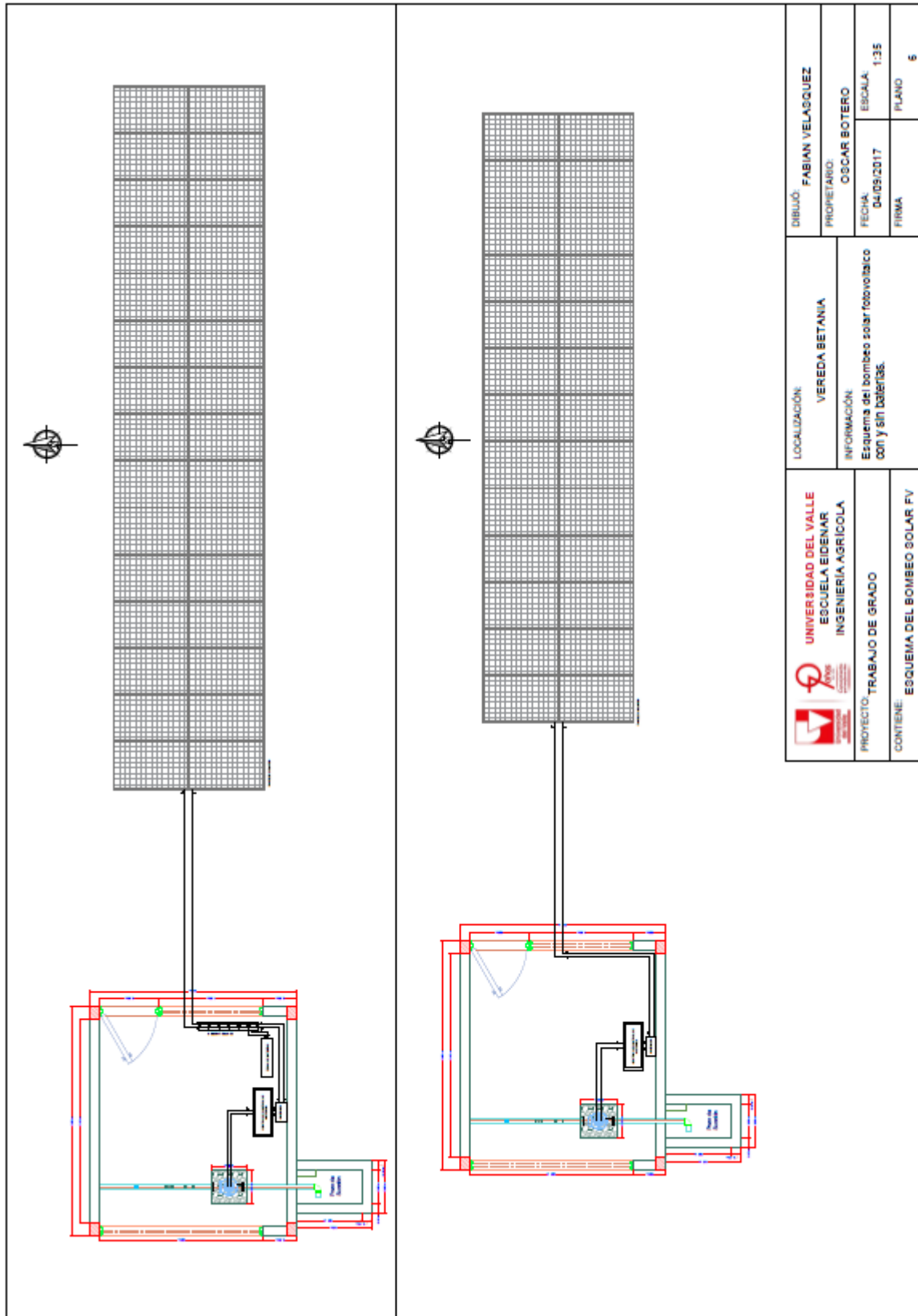
ANEXO 10. PLANOS Y ESQUEMAS











ANEXO 11. PRESUPUESTO

Presupuesto de los equipos para el bombeo eléctrico

Equipos	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
BOMBA CENTRÍFUGA MULTIETAPAS VERTICAL, CR 20-14 A-F-A-E-HQQE-GRUNDFOS	Und	1	\$ 18,278,400.00	\$ 18,278,400.00
VÁLVULA PIE 3" FE SERIE 125 REF HDVP075	Und	1	\$ 177,786.00	\$ 177,786.00
CODO DE RADIO LARGO PVC 90° RDE 21 3"	Und	1	\$ 72,334.00	\$ 72,334.00
REDUCCIÓN EXCÉNTRICA 3X2"	Und	1	\$ 140,000.00	\$ 140,000.00
REDUCCIÓN CONCÉNTRICA 3X2"	Und	1	\$ 140,000.00	\$ 140,000.00
SOPORTES DE TUBERÍA 3"	Und	4	\$ 60,000.00	\$ 240,000.00
VÁLVULA CHEQUE CORTINA 3" BRONCE SERIE 2	Und	1	\$ 789,684.00	\$ 789,684.00
VÁLVULA MARIPOSA 3" DISCO INO MAMU075	Und	1	\$ 146,132.00	\$ 146,132.00
MANÓMETRO GLICERINA 0-300 PSI MADP015	Und	1	\$ 60,809.00	\$ 60,809.00
MEDIDOR FLUJO 3" MF103	Und	1	\$ 2,926,200.00	\$ 2,926,200.00
ADAPTADOR MACHO 3"	Und	6	\$ 25,127.00	\$ 150,762.00
FLANCHE STD 3"	Und	6	\$ 152,400.00	\$ 914,400.00
TABLERO DE CONTROL	Und	1	\$ 7,000,000.00	\$ 7,000,000.00
TRANSPORTE DE EQUIPOS	VJE	2	\$ 350,000.00	\$ 700,000.00
COSTO TOTAL DE MATERIALES				\$ 31,736,507.00
COSTOS INDIRECTOS AIU		15%	\$ 31,736,507.00	\$ 4,760,476.05
COSTO TOTAL DE LOS EQUIPOS				\$ 36,496,983.05

Presupuesto de la tubería para el bombeo eléctrico

Tubería	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
TUBERÍAS PVC RDE 26 TRAMOS DE 6 METROS PRESIÓN DE TRABAJO 160 PSI, 3"	ML	4	\$ 26,628.00	\$ 106,512.00
TUBERÍAS PVC RDE 21 TRAMOS DE 6 METROS PRESIÓN DE TRABAJO 200 PSI, 2.5"	ML	180	\$ 27,094.50	\$ 4,877,010.00
TUBERÍAS PVC RDE 13.5 TRAMOS DE 6 METROS PRESIÓN DE TRABAJO 315 PSI, 3"	ML	145	\$ 51,801.00	\$ 7,511,145.00
TUBERÍA DE PVC RDE 51 DE 8", TRAMOS DE 6 M UNIÓN PLATINO PRESIÓN DE TRABAJO 125 PSI	Und	3.0	\$ 409,589.00	\$ 1,228,767.00
TUBERÍA DE PVC RDE 51 DE 4", TRAMOS DE 6 M UNIÓN PLATINO PRESIÓN DE TRABAJO 125 PSI	Und	9.0	\$ 68,352.00	\$ 615,168.00
TUBERÍA DE PVC RDE 51 DE 3", TRAMOS DE 6 M UNIÓN PLATINO PRESIÓN DE TRABAJO 125 PSI	Und	9.0	\$ 88,613.00	\$ 797,517.00
INSTALACIÓN DE TUBERÍA DE PVC RDE 51 DE 8"	ML	15.0	\$ 8,949.00	\$ 134,235.00
INSTALACIÓN DE TUBERÍA DE PVC RDE 51 DE 4"	ML	48.4	\$ 6,859.00	\$ 331,632.65
INSTALACIÓN DE TUBERÍA DE PVC RDE 51 DE 3"	ML	50.0	\$ 4,484.00	\$ 224,200.00
TRANSPORTE DE TUBERÍA	VJE	2.0	\$ 350,000.00	\$ 700,000.00
COSTO TOTAL DE MATERIALES				\$ 16,526,186.65
COSTOS INDIRECTOS AIU		15%	\$ 16,526,186.65	\$ 2,478,928.00
COSTO TOTAL DE LA TUBERÍA				\$ 19,005,114.65

Presupuesto de la obra civil para el bombeo eléctrico

Obra civil	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
DESVIACION TEMPORAL CAUCE	ML	1.0	\$ 129,485.00	\$ 129,485.00
EXCAVACION A MAQUINA SIN RETIRO	M ³	170	\$ 5,016.00	\$ 852,720.00
RETIRO MAT. EXCAV. A MAQUINA (SIN TRANSP)	M ³	170	\$ 6,308.00	\$ 1,072,360.00
VOLQUETA 5 M3	VJE	34	\$ 86,450.00	\$ 2,939,300.00
CONCRETO CICLOPEO 3000 PSI RELAC.60C/40P	M ³	14.0	\$ 483,968.00	\$ 6,775,552.00
SOLADO ESPESOR E=0.07M 3000 PSI 210 MPA	M ²	1.0	\$ 44,498.00	\$ 44,498.00

ACERO REFUERZO FLEJADO 60000 PSI 420MPA	Kg	600.0	\$ 5,833.00	\$ 3,499,800.00
ENCOFRADO DE MADERA Y METALICO/ MES	Und	3.0	\$ 350,000.00	\$ 1,050,000.00
REJILLA HIERRO D=1/2" E=1/2" 0.6X0.40MTS	Und	1.0	\$ 54,530.00	\$ 54,530.00
COMPUERTA	Und	2.0	\$ 300,000.00	\$ 600,000.00
VÁLVULA DE BOLA 6"	Und	2.0	\$ 42,140.00	\$ 84,280.00
CONTRAPISO REFORZADO E=20CM 3.000PSI	M ²	6.3	\$ 73,960.00	\$ 465,948.00
ENCHAPE CERAMICA 20.1-25.0X40.0-45.0CM	M ²	5.3	\$ 81,111.00	\$ 427,657.75
COLUMNA AMARRE MURO	ML	8.8	\$ 56,259.00	\$ 495,079.20
MURO BLOQUE CONCRETO 14X19X39CM	M ²	8.6	\$ 41,570.00	\$ 356,670.60
TEJA PLASTICA ONDULADA AJOVER	M ²	6.5	\$ 27,340.00	\$ 177,710.00
PUERTA EN LAMINA GAL. 90 CM	Und	1.0	\$ 350,000.00	\$ 350,000.00
VENTANA EN LAMINA GAL. CON REJA DE SEGURIDAD 2.5 M X 1.6 M	Und	1.0	\$ 250,000.00	\$ 250,000.00
VENTANA EN LAMINA GAL. CON REJA DE SEGURIDAD 1.6 M X 1.6 M	Und	1.0	\$ 250,000.00	\$ 250,000.00
CABALLETE TEJA ASBESTO CEMENTO ARTICULAD	ML	2.0	\$ 41,420.00	\$ 82,840.00
TRANSPORTE DE MATERIALES	VJE	2.0	\$ 350,000.00	\$ 700,000.00
COSTO TOTAL DE MATERIALES				\$ 20,658,430.55
COSTOS INDIRECTOS AIU		15%	\$ 20,658,430.55	\$ 3,098,764.58
COSTO TOTAL DE LA OBRA				\$ 23,757,195.13

Presupuesto de los equipos para el bombeo solar fotovoltaico con baterías

Equipos	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
PANEL SOLAR AMPASOLAR 280WP /24V MARCA SIEMENS	Und	30	\$ 620,000.00	\$ 18,600,000.00
BATERÍA TIPO VRLA EN GEL, MARCA MTEK, REF. MT122050FT (12V205AH)	Und	6	\$ 1,166,200.00	\$ 6,997,200.00
CONTROLADOR MPPT, MARCA OUTBACK POWER, SERIE FLEXMAX 60 (FM60-150VDC)	Und	6	\$ 1,969,203.67	\$ 11,815,222.02
INVERSOR TIPO ONDA SENOIDAL PURA, MARCA EVERSOL, SERIE TLC15K	Und	1	\$ 17,195,500.00	\$ 17,195,500.00
SOPORTES	Und	15	\$ 500,000.00	\$ 7,500,000.00
CABLEADO	Und	1	\$ 5,000,000.00	\$ 5,000,000.00
INSTALACIÓN	Und	1	\$ 8,000,000.00	\$ 8,000,000.00
TRANSPORTE	VJE	1	\$ 1,000,000.00	\$ 1,000,000.00
COSTO TOTAL DE MATERIALES				\$ 76,107,922.02
COSTOS INDIRECTOS AIU		15%	\$ 76,107,922.02	\$ 11,416,188.30
COSTO TOTAL DE LOS EQUIPOS				\$ 87,524,110.32

Presupuesto de los equipos para el bombeo solar fotovoltaico sin baterías

Equipos	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
PANEL SOLAR AMPASOLAR 280WP /24V MARCA SIEMENS	Und	26	\$ 620,000.00	\$ 16,120,000.00
INVERSOR TIPO ONDA SENOIDAL PURA, MARCA EVERSOL, SERIE TLC15K	Und	1	\$ 17,195,500.00	\$ 17,195,500.00
SOPORTES	Und	13	\$ 500,000.00	\$ 6,500,000.00
CABLEADO	Und	1	\$ 3,500,000.00	\$ 3,500,000.00
INSTALACIÓN	Und	1	\$ 6,000,000.00	\$ 6,000,000.00
TRANSPORTE	VJE	1	\$ 1,000,000.00	\$ 1,000,000.00
COSTO TOTAL DE MATERIALES				\$ 50,315,500.00
COSTOS INDIRECTOS AIU		15%	\$ 50,315,500.00	\$ 7,547,325.00
COSTO TOTAL DE LOS EQUIPOS				\$ 57,862,825.00

Presupuesto de los equipos para el bombeo hidráulico ROCHFER

Equipos	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
BOMBA MSG-70D + RUEDA 1.90X0.36	Und	1	\$ 11,722,697.30	\$ 11,722,697.30
SOPORTE TIPO B	Und	1	\$ 438,752.20	\$ 438,752.20
IMPORTACIÓN	VJE	1	\$ 2,895,329.51	\$ 2,895,329.51
INSTALACIÓN BOMBA ROCHFER	Und	1	\$ 1,000,000.00	\$ 1,000,000.00
ADAPTADOR MACHO DE 1 ¼	Und	6	\$ 3,819.00	\$ 22,914.00
CODO DE 90° DE 1 ¼	Und	1	\$ 4,183.00	\$ 4,183.00
UNIÓN UNIVERSAL DE 1 ¼	Und	2	\$ 18,698.00	\$ 37,396.00
TEE SCHEDULE 40 DE 1 ¼	Und	1	\$ 7,822.00	\$ 7,822.00
VÁLVULA DE ASPIRACIÓN DE 1 ¼	Und	1	\$ 36,970.60	\$ 36,970.60
VÁLVULA DE BOLA H2OFF SOLDADA DE 1 ¼	Und	1	\$ 19,264.00	\$ 19,264.00
VÁLVULA DE CHEQUE HORIZONTAL DE 1 ¼	Und	1	\$ 55,000.00	\$ 55,000.00
BUJE ROSCADO DE 1¼ X ½	Und	12	\$ 4,589.00	\$ 55,068.00
CINTA TEFLÓN BASIC 1/2" X 10 M	Und	3	\$ 2,000.00	\$ 6,000.00
TRANSPORTE DE MATERIALES	VJE	1	\$ 1,000,000.00	\$ 1,000,000.00
COSTO TOTAL DE MATERIALES				\$ 17,301,396.61
COSTOS INDIRECTOS AIU		15%	\$ 17,301,396.61	\$ 2,595,209.49
COSTO TOTAL DE LOS EQUIPOS				\$ 19,896,606.10

Presupuesto de la tubería para el bombeo hidráulico ROCHFER

Tubería	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
TUBERÍA DE PVC RDE 9 DE ½ , TRAMOS DE 6 M EXTREMO LISO	ML	420	7815.00	\$ 3,282,300.00
PRESIÓN DE TRABAJO 500 PSI				
TUBERÍA DE PVC RDE 51 DE 6", TRAMOS DE 6 M UNIÓN PLATINO	ML	45.0	\$ 67,982.00	\$ 3,059,190.00
PRESIÓN DE TRABAJO 125 PSI				
TRANSPORTE DE TUBERÍA	VJE	1.0	\$ 300,000.00	\$ 300,000.00
SOPORTES DE TUBERÍA	Und	9	\$ 50,000.00	\$ 450,000.00
COSTO TOTAL DE MATERIALES				\$ 7,091,490.00
COSTOS INDIRECTOS AIU		15%	\$ 7,091,490.00	\$ 1,063,723.50
COSTO TOTAL DE LOS EQUIPOS				\$ 8,155,213.50

Presupuesto de la obra civil para el bombeo hidráulico ROCHFER

Obra civil	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
DESVIACION TEMPORAL CAUCE	ML	1.7	\$ 534,050.00	\$ 907,885.00
EXCAVACION TIERRA A MANO	M³	3	\$ 19,817.00	\$ 59,451.00
CONCRETO CICLOPEO 3000 PSI RELAC.60C/40P	M³	4.5	\$ 483,968.00	\$ 2,177,856.00
SOLADO ESPESOR E=0.07M 3000 PSI 210 MPA	M²	2.0	\$ 44,498.00	\$ 88,996.00
ACERO REFUERZO FLEJADO 60000 PSI 420MPA	Kg	250.0	\$ 5,833.00	\$ 1,458,250.00
ENCOFRADO DE MADERA Y METALICO/ MES	Und	1.0	\$ 350,000.00	\$ 350,000.00
REJILLA HIERRO D=1" E=1" 0.7X0.40MTS	Und	1.0	\$ 81,795.00	\$ 81,795.00
COMPUERTA	Und	1.0	\$ 300,000.00	\$ 300,000.00
SOPORTE DE TUBERIA GALVIZADO 3" 3 M	Und	3.0	\$ 370,180.80	\$ 1,110,542.40
ZAPATA CONCRETO 3000 PSI INC. FORMALETA	M³	1.0	\$ 622,478.00	\$ 622,478.00
SOLADO ESPESOR E=0.07M 3000 PSI 210 MPA PARA CANAL DE EXCESOS	M²	20.0	\$ 44,498.00	\$ 889,960.00
CONCRETO CICLOPEO 3000 PSI RELAC.60C/40P	M³	4.5	\$ 483,968.00	\$ 2,177,856.00
OTROS MATERIALES				\$ 1,500,000.00
COSTO TOTAL DE MATERIALES				\$ 11,725,069.40
COSTOS INDIRECTOS AIU		15%	\$ 11,725,069.40	\$ 1,758,760.41
COSTO TOTAL DE LA OBRA				\$ 13,483,829.81

ANEXO 12. FLUJO DE CAJA

Flujo de caja libre para el sistema de bombeo eléctrico

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Saldo	\$ 79,259,293	\$ 79,259,293	\$ 74,954,252	\$ 70,089,987	\$ 64,593,854	\$ 58,383,773	\$ 51,367,002	\$ 43,438,753	\$ 34,480,625	\$ 24,358,835	\$ 12,922,226
Capital	\$ -	\$ -	\$ 4,305,040	\$ 4,864,265	\$ 5,496,133	\$ 6,210,081	\$ 7,016,771	\$ 7,928,249	\$ 8,958,129	\$ 10,121,789	\$ 11,436,610
Intereses	\$ -	\$ -	\$ 10,295,782	\$ 9,736,557	\$ 9,104,689	\$ 8,390,742	\$ 7,584,052	\$ 6,672,574	\$ 5,642,694	\$ 4,479,033	\$ 3,164,213
Cuota	\$ -	\$ -	\$ 14,600,823	\$ 14,600,823	\$ 14,600,823	\$ 14,600,823	\$ 14,600,823	\$ 14,600,823	\$ 14,600,823	\$ 14,600,823	\$ 14,600,823
Ingreso bruto	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000
Costo de producción	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000
Costo de operación y mantenimiento	\$ 1,703,552	\$ 1,703,552	\$ 1,703,552	\$ 1,703,552	\$ 1,703,552	\$ 1,703,552	\$ 1,703,552	\$ 1,703,552	\$ 1,703,552	\$ 1,703,552	\$ 1,703,552
Utilidad operacional	\$ 6,036,448	\$ 6,036,448	\$ 6,036,448	\$ 6,036,448	\$ 6,036,448	\$ 6,036,448	\$ 6,036,448	\$ 6,036,448	\$ 6,036,448	\$ 6,036,448	\$ 6,036,448
Depreciación tubería	\$ 1,185,265	\$ 1,144,394	\$ 1,103,523	\$ 1,062,652	\$ 1,021,780	\$ 980,909	\$ 940,038	\$ 899,167	\$ 858,296	\$ 817,424	\$ 776,552
Depreciación obra civil	\$ 2,149,461	\$ 2,036,331	\$ 1,923,202	\$ 1,810,072	\$ 1,696,943	\$ 1,583,813	\$ 1,470,684	\$ 1,357,554	\$ 1,244,425	\$ 1,131,295	\$ 1,018,165
Depreciación equipos	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698
Gastos financieros	\$ -	\$ 10,295,782	\$ 9,736,557	\$ 9,104,689	\$ 8,390,742	\$ 7,584,052	\$ 6,672,574	\$ 5,642,694	\$ 4,479,033	\$ 3,164,213	\$ 1,852,383
Utilidad neta	\$ 947,976	\$ 11,089,757	\$ 10,376,532	\$ 9,590,663	\$ 8,722,715	\$ 7,762,025	\$ 6,696,545	\$ 5,512,665	\$ 4,195,003	\$ 2,726,182	\$ 1,253,015
Generación de efectivo	\$ 6,036,448	\$ 4,259,334	\$ 3,700,109	\$ 3,068,241	\$ 2,354,294	\$ 1,547,604	\$ 636,126	\$ 393,754	\$ 1,557,415	\$ 2,872,235	\$ 4,627,235
Desembolso de crédito	\$ 79,259,293	\$ -	\$ 4,305,040	\$ 4,864,265	\$ 5,496,133	\$ 6,210,081	\$ 7,016,771	\$ 7,928,249	\$ 8,958,129	\$ 10,121,789	\$ 11,436,610
Pagos a capital	\$ -	\$ -	\$ 4,305,040	\$ 4,864,265	\$ 5,496,133	\$ 6,210,081	\$ 7,016,771	\$ 7,928,249	\$ 8,958,129	\$ 10,121,789	\$ 11,436,610
Inversión	\$ 79,259,293	\$ -	\$ 4,305,040	\$ 4,864,265	\$ 5,496,133	\$ 6,210,081	\$ 7,016,771	\$ 7,928,249	\$ 8,958,129	\$ 10,121,789	\$ 11,436,610
Valor del mercado	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 7,311,360
Flujo de caja libre del inversionista	\$ -	\$ 6,036,448	\$ 8,564,375	\$ 8,564,375	\$ 8,564,375	\$ 8,564,375	\$ 8,564,375	\$ 8,564,375	\$ 8,564,375	\$ 8,564,375	\$ 1,253,015

Flujo de caja libre para el sistema de bombeo solar fotovoltaico con baterías

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Saldo	\$ 166,783,403	\$ 166,620,370	\$ 157,540,199	\$ 147,280,515	\$ 135,688,098	\$ 122,589,826	\$ 107,790,088	\$ 91,067,865	\$ 72,173,424	\$ 50,824,596	\$ 26,702,555
Capital	\$ 163,034	\$ 9,080,170	\$ 10,259,684	\$ 11,592,417	\$ 13,098,272	\$ 14,799,738	\$ 16,722,224	\$ 18,894,440	\$ 21,348,828	\$ 24,122,041	\$ 27,122,041
Intereses	\$ 166,783,403	\$ 21,643,986	\$ 20,464,472	\$ 19,131,739	\$ 17,625,884	\$ 15,924,418	\$ 14,001,932	\$ 11,829,716	\$ 9,375,328	\$ 6,602,115	\$ 4,122,115
Cuota	\$ 166,946,437	\$ 30,724,156	\$ 30,724,156	\$ 30,724,156	\$ 30,724,156	\$ 30,724,156	\$ 30,724,156	\$ 30,724,156	\$ 30,724,156	\$ 30,724,156	\$ 30,724,156
Ingreso bruto	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000
Costo de producción	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000
Costo de operación y mantenimiento	\$ 500,000	\$ 500,000	\$ 500,000	\$ 500,000	\$ 500,000	\$ 500,000	\$ 500,000	\$ 500,000	\$ 500,000	\$ 500,000	\$ 500,000
Utilidad operacional	\$ 7,240,000	\$ 7,240,000	\$ 7,240,000	\$ 7,240,000	\$ 7,240,000	\$ 7,240,000	\$ 7,240,000	\$ 7,240,000	\$ 7,240,000	\$ 7,240,000	\$ 7,240,000
Depreciación tubería	\$ 1,185,265	\$ 1,144,394	\$ 1,103,523	\$ 1,062,652	\$ 1,021,780	\$ 980,909	\$ 940,038	\$ 899,167	\$ 858,296	\$ 817,424	\$ 776,552
Depreciación de equipos paneles	\$ 3,451,233	\$ 3,451,233	\$ 3,451,233	\$ 3,451,233	\$ 3,451,233	\$ 3,451,233	\$ 3,451,233	\$ 3,451,233	\$ 3,451,233	\$ 3,451,233	\$ 3,451,233
Depreciación paneles	\$ 1,334,000	\$ 1,288,000	\$ 1,242,000	\$ 1,196,000	\$ 1,150,000	\$ 1,104,000	\$ 1,058,000	\$ 1,012,000	\$ 966,000	\$ 920,000	\$ 874,000
Depreciación cableado u otros	\$ 2,132,976	\$ 2,020,714	\$ 1,908,452	\$ 1,796,190	\$ 1,683,929	\$ 1,571,667	\$ 1,459,405	\$ 1,347,143	\$ 1,234,881	\$ 1,122,619	\$ 1,010,357
Depreciación batería	\$ 1,609,356	\$ 1,609,356	\$ 1,609,356	\$ 1,609,356	\$ 1,609,356	\$ 1,609,356	\$ 1,609,356	\$ 1,609,356	\$ 1,609,356	\$ 1,609,356	\$ 1,609,356
Depreciación obra civil	\$ 2,149,461	\$ 2,036,331	\$ 1,923,202	\$ 1,810,072	\$ 1,696,943	\$ 1,583,813	\$ 1,470,684	\$ 1,357,554	\$ 1,244,425	\$ 1,131,295	\$ 1,018,165
Depreciación equipos (bomba)	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698
Compra de batería	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 8,046,780	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 8,046,780
Gastos financieros	\$ 166,783,403	\$ 21,643,986	\$ 20,464,472	\$ 19,131,739	\$ 17,625,884	\$ 15,924,418	\$ 14,001,932	\$ 11,829,716	\$ 9,375,328	\$ 6,602,115	\$ 4,122,115
Utilidad neta	\$ 175,055,392	\$ 29,603,713	\$ 28,111,936	\$ 26,466,940	\$ 24,695,603	\$ 22,635,095	\$ 20,400,346	\$ 17,915,867	\$ 15,149,216	\$ 12,110,521	\$ 9,122,521
Generación de efectivo	\$ 159,543,403	\$ 14,403,986	\$ 13,224,472	\$ 11,891,739	\$ 10,432,664	\$ 8,684,418	\$ 6,761,932	\$ 4,589,716	\$ 2,135,328	\$ 740,895	\$ -
Desembolso de crédito	\$ 166,783,403	\$ -	\$ 4,305,040	\$ 4,864,265	\$ 5,496,133	\$ 6,210,081	\$ 7,016,771	\$ 7,928,249	\$ 8,958,129	\$ 10,121,789	\$ 11,436,610
Pagos a capital	\$ -	\$ -	\$ 4,305,040	\$ 4,864,265	\$ 5,496,133	\$ 6,210,081	\$ 7,016,771	\$ 7,928,249	\$ 8,958,129	\$ 10,121,789	\$ 11,436,610
Inversión	\$ 166,783,403	\$ -	\$ 4,305,040	\$ 4,864,265	\$ 5,496,133	\$ 6,210,081	\$ 7,016,771	\$ 7,928,249	\$ 8,958,129	\$ 10,121,789	\$ 11,436,610
Valor del mercado	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 7,311,360
Flujo de caja libre del inversionista	\$ -	\$ 159,706,437	\$ 23,484,156	\$ 23,484,156	\$ 23,484,156	\$ 23,484,156	\$ 23,484,156	\$ 23,484,156	\$ 23,484,156	\$ 23,484,156	\$ 24,219,576

Flujo de caja libre para el sistema de bombeo solar fotovoltaico sin baterías

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Saldo	\$ 137,122,118	\$ 129,674,205	\$ 121,258,809	\$ 111,750,253	\$ 101,006,536	\$ 88,867,209	\$ 75,150,984	\$ 59,653,022	\$ 42,141,874	\$ 22,356,027	\$ 0
Capital		\$ 7,447,912	\$ 8,415,396	\$ 9,508,556	\$ 10,743,718	\$ 12,139,326	\$ 13,716,225	\$ 15,497,963	\$ 17,511,148	\$ 19,785,846	\$ 22,356,027
Intereses		\$ 17,812,163	\$ 16,844,679	\$ 15,751,519	\$ 14,516,358	\$ 13,120,749	\$ 11,543,850	\$ 9,762,113	\$ 7,748,927	\$ 5,474,229	\$ 2,904,048
Cuota		\$ 25,260,075	\$ 25,260,075	\$ 25,260,075	\$ 25,260,075	\$ 25,260,075	\$ 25,260,075	\$ 25,260,075	\$ 25,260,075	\$ 25,260,075	\$ 25,260,075
Ingreso bruto		\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000
Costo de producción		\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000
Costo de operación y mantenimiento		\$ 500,000	\$ 500,000	\$ 500,000	\$ 500,000	\$ 500,000	\$ 500,000	\$ 500,000	\$ 500,000	\$ 500,000	\$ 500,000
Utilidad operacional		\$ 7,240,000	\$ 7,240,000	\$ 7,240,000	\$ 7,240,000	\$ 7,240,000	\$ 7,240,000	\$ 7,240,000	\$ 7,240,000	\$ 7,240,000	\$ 7,240,000
Depreciación tubería		\$ 1,185,265	\$ 1,144,394	\$ 1,103,523	\$ 1,062,652	\$ 1,021,780	\$ 980,909	\$ 940,038	\$ 899,167	\$ 858,296	\$ 817,424
Depreciación de inversor		\$ 1,977,483	\$ 1,977,483	\$ 1,977,483	\$ 1,977,483	\$ 1,977,483	\$ 1,977,483	\$ 1,977,483	\$ 1,977,483	\$ 1,977,483	\$ 1,977,483
Depreciación paneles		\$ 1,156,133	\$ 1,116,267	\$ 1,076,400	\$ 1,036,533	\$ 996,667	\$ 956,800	\$ 916,933	\$ 877,067	\$ 837,200	\$ 797,333
Depreciación cableado u otros		\$ 1,768,810	\$ 1,675,714	\$ 1,582,619	\$ 1,489,524	\$ 1,396,429	\$ 1,303,333	\$ 1,210,238	\$ 1,117,143	\$ 1,024,048	\$ 930,952
Depreciación obra civil		\$ 2,149,461	\$ 2,036,331	\$ 1,923,202	\$ 1,810,072	\$ 1,696,943	\$ 1,583,813	\$ 1,470,684	\$ 1,357,554	\$ 1,244,425	\$ 1,131,295
Depreciación equipos (bomba)		\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698	\$ 3,649,698
Gastos financieros		\$ 17,812,163	\$ 16,844,679	\$ 15,751,519	\$ 14,516,358	\$ 13,120,749	\$ 11,543,850	\$ 9,762,113	\$ 7,748,927	\$ 5,474,229	\$ 2,904,048
Utilidad neta		\$ 22,459,012	\$ 21,204,566	\$ 19,824,443	\$ 18,302,319	\$ 16,619,748	\$ 14,755,887	\$ 12,687,187	\$ 10,387,039	\$ 7,825,378	\$ 4,968,234
Generación de efectivo		\$ 10,572,163	\$ 9,604,679	\$ 8,511,519	\$ 7,276,358	\$ 5,880,749	\$ 4,303,850	\$ 2,522,113	\$ 508,927	\$ 1,765,771	\$ 4,335,952
Desembolso de crédito	\$ 137,122,118										
Pagos a capital		\$ 7,447,912	\$ 8,415,396	\$ 9,508,556	\$ 10,743,718	\$ 12,139,326	\$ 13,716,225	\$ 15,497,963	\$ 17,511,148	\$ 19,785,846	\$ 22,356,027
Inversión	\$ 137,122,118										
Valor del mercado											\$ 7,311,360
Flujo de caja libre del inversionista	\$ -	\$ 18,020,075	\$ 18,020,075	\$ 18,020,075	\$ 18,020,075	\$ 18,020,075	\$ 18,020,075	\$ 18,020,075	\$ 18,020,075	\$ 18,020,075	\$ 10,708,715

Flujo de caja libre para el sistema de bombeo hidráulico ROCHFERR

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Saldo	\$ 41,535,649	\$ 39,279,603	\$ 36,730,496	\$ 33,850,260	\$ 30,595,881	\$ 26,918,759	\$ 22,763,978	\$ 18,069,492	\$ 12,765,191	\$ 6,771,862	\$ 0
Capital		\$ 2,256,047	\$ 2,549,107	\$ 2,880,236	\$ 3,254,379	\$ 3,677,122	\$ 4,154,781	\$ 4,694,487	\$ 5,304,300	\$ 5,993,329	\$ 6,771,862
Intereses		\$ 5,395,481	\$ 5,102,420	\$ 4,771,291	\$ 4,397,149	\$ 3,974,405	\$ 3,496,747	\$ 2,957,041	\$ 2,347,227	\$ 1,658,198	\$ 879,665
Cuota		\$ 7,651,527	\$ 7,651,527	\$ 7,651,527	\$ 7,651,527	\$ 7,651,527	\$ 7,651,527	\$ 7,651,527	\$ 7,651,527	\$ 7,651,527	\$ 7,651,527
Ingreso bruto		\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000	\$ 13,860,000
Costo de producción		\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000	\$ 6,120,000
Costo de operación y mantenimiento		\$ 400,000	\$ 400,000	\$ 400,000	\$ 400,000	\$ 400,000	\$ 400,000	\$ 400,000	\$ 400,000	\$ 400,000	\$ 400,000
Utilidad operacional		\$ 7,340,000	\$ 7,340,000	\$ 7,340,000	\$ 7,340,000	\$ 7,340,000	\$ 7,340,000	\$ 7,340,000	\$ 7,340,000	\$ 7,340,000	\$ 7,340,000
Depreciación tubería		\$ 508,605	\$ 491,067	\$ 473,529	\$ 455,990	\$ 438,452	\$ 420,914	\$ 403,376	\$ 385,838	\$ 368,300	\$ 350,762
Depreciación obra civil		\$ 1,219,966	\$ 1,155,757	\$ 1,091,548	\$ 1,027,339	\$ 963,131	\$ 898,922	\$ 834,713	\$ 770,505	\$ 706,296	\$ 642,087
Depreciación equipos		\$ 1,989,661	\$ 1,989,661	\$ 1,989,661	\$ 1,989,661	\$ 1,989,661	\$ 1,989,661	\$ 1,989,661	\$ 1,989,661	\$ 1,989,661	\$ 1,989,661
Gastos financieros		\$ 5,395,481	\$ 5,102,420	\$ 4,771,291	\$ 4,397,149	\$ 3,974,405	\$ 3,496,747	\$ 2,957,041	\$ 2,347,227	\$ 1,658,198	\$ 879,665
Utilidad neta		\$ 1,773,712	\$ 1,398,904	\$ 986,029	\$ 530,139	\$ 25,649	\$ 533,756	\$ 1,155,209	\$ 1,846,770	\$ 2,617,545	\$ 3,477,825
Generación de efectivo		\$ 1,944,519	\$ 2,237,580	\$ 2,568,709	\$ 2,942,851	\$ 3,365,595	\$ 3,843,253	\$ 4,382,959	\$ 4,992,773	\$ 5,681,802	\$ 6,460,335
Desembolso de crédito	\$ 41,535,649										
Pagos a capital		\$ 2,256,047	\$ 2,549,107	\$ 2,880,236	\$ 3,254,379	\$ 3,677,122	\$ 4,154,781	\$ 4,694,487	\$ 5,304,300	\$ 5,993,329	\$ 6,771,862
Inversión	\$ 41,535,649										
Valor del mercado											\$ 4,689,079
Flujo de caja libre del inversionista	\$ -	\$ 311,527	\$ 311,527	\$ 311,527	\$ 311,527	\$ 311,527	\$ 311,527	\$ 311,527	\$ 311,527	\$ 311,527	\$ 4,377,552