

DISEÑO DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR TIPO MODULAR QUE UTILICE
FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y REUTILIZACIÓN DE AGUA PARA UNA
FAMILIA DEL MUNICIPIO CARTAGENA DEL CHAIRÁ-CAQUETÁ.

DAVID SANTIAGO ALVARADO MONROY

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C

2024

DISEÑO DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR TIPO MODULAR QUE UTILICE
FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y REUTILIZACIÓN DE AGUA PARA UNA
FAMILIA DEL MUNICIPIO CARTAGENA DEL CHAIRÁ-CAQUETÁ.

DAVID SANTIAGO ALVARADO MONROY

Trabajo de grado en la modalidad de solución de un problema de ingeniería para
optar al título de Ingeniero Mecánico

Director. Ing. Héctor Fabio Montaña Morales

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C

2024

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	6
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE GRÁFICAS.....	8
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	9
JUSTIFICACIÓN.....	11
OBJETIVOS.....	12
OBJETIVO GENERAL.....	12
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
MARCO REFERENCIAL.....	13
MARCO CONCEPTUAL.....	13
MARCO TEÓRICO.....	14
Vivienda Modular.....	14
Energía solar fotovoltaica.....	14
Sistema de reutilización de agua lluvia.....	18
Metodología de matriz pugh y proceso analítico jerárquico.....	19
ESTADO DEL ARTE.....	20
PARÁMETROS INICIALES.....	22
1.1 PARÁMETROS NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO.....	22
1.1.1 Características de Cartagena del Chairá-Caquetá.....	22
1.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE LA POBLACIÓN.....	22
1.2.1 Cantidad de habitantes por vivienda.....	23
1.2.2 Habitantes con vivienda propia.....	23
1.2.3 Ingresos mensuales de los habitantes.....	24
1.2.4 Cortes de energía eléctrica.....	25
1.2.5 Electrodomésticos presentes en la vivienda.....	26
DETERMINACIÓN VIVIENDA MODULAR.....	27
2.1 SELECCIÓN DE LA VIVIENDA.....	27
2.2 DIAGRAMA DE LA VIVIENDA SELECCIONADA.....	29
DISEÑO SOLAR FOTOVOLTAICO.....	31

3.1	DEMANDA ENERGÉTICA.....	31
3.2	ESTIMACIÓN DEL CONSUMO ELÉCTRICO.....	32
3.3	RENDIMIENTO GLOBAL DE LA INSTALACIÓN.....	32
3.4	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	33
3.4.1	Selección de módulos.....	33
3.4.2	Cálculo de horas solar pico.....	34
3.4.3	Cantidad de módulos.....	34
3.4.4	Tensión e intensidad de los módulos.....	35
3.5	INVERSOR.....	36
3.5.1	Selección del inversor.....	36
3.5.2	Límites de tensión.....	38
3.6	BATERÍAS.....	39
3.6.1	Nubosidad.....	39
3.6.2	Profundidad de descarga y cálculo de las baterías.....	40
3.6.3	Selección de las baterías.....	40
3.6.4	Cantidad de baterías.....	42
3.7	REGULADOR DE CARGA.....	42
3.8	DIAGRAMA UNIFILAR.....	44
	DISEÑO REUTILIZACIÓN DE AGUA.....	46
4.1	ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA.....	46
4.2	CANALETAS Y BAJANTES.....	47
4.3	FILTRACIÓN.....	49
4.4	SISTEMA DE BOMBEO.....	49
4.4.1	Cálculo del NPSH requerido.....	55
4.4.2	Cálculo de las curvas características.....	56
4.5	ESQUEMA HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE BOMBEO.....	57
4.6	PLANO HIDRÁULICO DE LA VIVIENDA.....	58
	PLANO FINAL DE LOS SISTEMAS A IMPLEMENTAR EN LA VIVIENDA.....	59
	EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO.....	60
5.1	EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA FOTOVOLTAICA.....	60

5.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE REUTILIZACIÓN DE AGUA.	60
5.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA VIVIENDA SELECCIONADA.	61
5.4 EVALUACIÓN DE COSTOS FINALES.	61
5.5 EVALUACIÓN DE DISEÑO.	62
CONCLUSIONES	63
REFERENCIAS	64

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Ventajas y Desventajas Sistemas Fotovoltaicos.	16
Tabla 2. Ventajas y desventajas del sistema de reutilización de agua lluvia.	18
Tabla 3. Escala de principio de descomposición.	20
Tabla 4. Matriz de comparación.	20
Tabla 5. Características de la región.	22
Tabla 6. Habitantes por vivienda.	24
Tabla 7. Ingresos mensuales de los habitantes	25
Tabla 8. Corte de energía eléctrica.	25
Tabla 9. Electrodomésticos comunes en el hogar.	26
Tabla 10. Características de las viviendas modulares.	28
Tabla 11 Evaluación por matriz pugh de las viviendas preseleccionadas.	29
Tabla 12 Consumos eléctricos de una vivienda.	31
Tabla 13 Características de los módulos fotovoltaicos.	33
Tabla 14 Evaluación por matriz pugh de los módulos preseleccionados.	34
Tabla 15. Características operativas del módulo seleccionado.	36
Tabla 16. Características de los inversores seleccionados.	37
Tabla 17. Evaluación por matriz pugh de los inversores preseleccionados.	38
Tabla 18. Características de las baterías preseleccionadas.	41
Tabla 19. Evaluación por matriz pugh de las baterías seleccionadas.	42
Tabla 20. Características de los Reguladores preseleccionados.	43
Tabla 21. Evaluación por matriz pugh de los reguladores preseleccionadas.	44
Tabla 22. Dimensión de bajantes circulares	48
Tabla 23. Parámetros para seleccionar dimensiones del canal.	48
Tabla 24. Diámetro de succión e impulsión.	50
Tabla 25. Perdidas longitudinales.	51
Tabla 26. Pérdidas de carga de accesorios.	52
Tabla 28. Presupuestos de equipos eléctricos.	60
Tabla 29. Presupuestos de los equipos hidráulicos.	61
Tabla 30. Costos finales del proyecto.	61

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Elementos del sistema solar fotovoltaico.	16
Figura 2. Modalidades de captación de agua según su finalidad.	19
Figura 3. Plano de la vivienda seleccionada	30
Figura 4. Diagrama Unifilar.	45
Figura 5. Dimensiones de los tanques seleccionados	47
Figura 6. Ficha técnica de la bomba seleccionada.	54
Figura 7. Plano hidráulico del sistema de bombeo	57
Figura 8. Plano hidráulico de la vivienda.	58
Figura 9. Plano final de los sistemas a implementar.	59

LISTA DE GRÁFICAS.

Gráfica 1. Nubosidad de Cartagena del Chairá mensual.	40
Gráfica 2. Diagrama de Moody.	51
Gráfica 3. Curva característica del Sistema vs Curva característica de la Bomba.	56

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En el Plan Energético Nacional el empalme eléctrico se realiza mediante la conexión física al Sistema Interconectado Nacional (SIN) o a sistemas aislados. Las regiones de Colombia que no se encuentran conectadas al SIN, son denominadas Zonas No Interconectadas (ZNI).

En el país el principal sistema de generación eléctrica de las ZNI es dado por máquinas que funcionan a partir de derivados del petróleo. Por otro lado, actualmente se presentan sistemas que utilizan fuentes renovables como energía solar fotovoltaica, eólica e hidro-cinética [1].

Las ZNI principalmente se caracterizan por tener una baja población, así mismo, muchas de estas zonas cuentan con una accidentalidad geográfica y variantes climatológicas que hace muy difícil la instalación de la infraestructura energética y de acueducto, ya que implicaría altos costos en la inversión y operación de estos sistemas [2]. De otra manera las ZNI poseen una infraestructura vial muy limitada con difícil acceso por sus condiciones sociopolíticas y socioeconómicas, que implican su falta de salud y atención de servicios públicos entre otros factores [3].

Algunas regiones del Departamento del Caquetá hacen parte de estas ZNI, entre ellas Cartagena del Chairá. Este es un municipio donde no hay una adecuada infraestructura ni una educación suficiente para sus habitantes, debido a, la pobreza que se genera por parte del empoderamiento de grupos al margen de la ley. Por esta y más razones es difícil el acceso a dicha comunidad, que carece de energía eléctrica y de otros servicios públicos como abastecimiento de agua [4].

Existen dos empresas privadas que suplen la energía del municipio cuyo costo trimestral de comercialización de energía varía entre 332,42 y 641,92 \$/kWh para estratos 1, 2 y 3 [5]. Sin embargo, este valor es muy elevado con relación a la pobreza que se vive en esta zona, de acuerdo con esto el Ministerio de Minas y Energía, a través del Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE) y la Empresa Distribuidora del Pacífico Dispac S.A. E.S.P,

implementó un sistema de energía solar fotovoltaica el cual generó energía para 947 usuarios [6]. Por otro lado, el abastecimiento de agua del municipio presenta buena calidad del recurso, sin embargo, se presenta bajas condiciones de regulación y disponibilidad para demanda del consumo humano [7]. Y según Plan de Desarrollo Municipal Cartagena del Chairá la empresa prestadora de servicios públicos del municipio satisfizo tan solo el 57,47 % de la población por lo no cubre toda la demanda de la región [8].

Por tal motivo, este proyecto busca darle solución a la siguiente pregunta: ¿Como se puede optimizar una vivienda modular para que sea energéticamente sostenible y de igual forma minimizar el consumo de agua en un entorno rural como Cartagena del Chairá?

JUSTIFICACIÓN

Las ZNI son zonas del país que no están conectadas al SIN, además, por su ubicación son de difícil acceso, por lo que su infraestructura vial es limitada, y la baja densidad poblacional genera que los entes económicos del estado no tengan un aporte financiero significativo. Y esto se ve reflejado en el bajo desarrollo económico que estas regiones sufren por no tener un buen servicio de energía eléctrica, de saneamiento y abastecimiento básico del recurso hídrico.

Con base a lo anterior se han desarrollado varios proyectos de generación eléctrica renovable y de aprovechamiento de fuentes hídricas en Colombia. Las tecnologías utilizadas para obtener energía eléctrica y aprovechar agua lluvia con recursos naturales han supuesto la mejor opción para suplir las necesidades de estas regiones por los altos costos generados por la prestación de servicio de energía eléctrica y por el limitado abastecimiento de agua. Por lo cual el uso de energías renovables y aprovechamiento aguas lluvias trae varios beneficios para las familias de las ZNI como lo es la reducción de la dependencia energética al SIN, también es una energía inagotable ya que se adapta a los ciclos naturales, y son aliados contra el cambio climático ya que es una solución limpia y viable frente a la degradación medioambiental.

Las viviendas con energía renovable y sistemas de recolección y aprovechamiento de aguas lluvia brindan a sus habitantes comodidades tales como sistemas de calefacción, procesos de purificación, calentamiento de agua, procesamiento de alimentos, lavado de ropa, uso sanitario, aseo, etc. De igual manera este proyecto se enfoca en Cartagena del Chairá, un municipio del departamento del Caquetá que se ubica en una ZNI, esta región está denotada por la violencia que es generada por grupos al margen de la ley desde hace varios años.

Por eso el desarrollo de este proyecto permite que las familias de este municipio tengan una vivienda digna que satisfaga sus necesidades.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL.

Diseñar una vivienda unifamiliar tipo modular que utilice fuentes renovables de energía y de reutilización de agua para una familia del municipio Cartagena del Chairá-Caquetá.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Seleccionar un tipo de vivienda unifamiliar modular adecuada, de acuerdo con el clima, geografía y necesidades de la población del municipio.
- Desarrollar el diseño del sistema de transformación de energía para la vivienda.
- Desarrollar el diseño del sistema de reutilización de agua para la vivienda.

MARCO REFERENCIAL.

MARCO CONCEPTUAL.

Zona no interconectada:

Son los municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectados al Sistema Interconectado Nacional [9].

Construcción modular:

Es un sistema constructivo basado en el ensamblaje de unidades modulares prefabricadas y así permitir crear desde pequeños espacios arquitectónicos hasta edificios para múltiples usos y aplicaciones [10].

Energía renovable:

Se define como aquella que es producida de forma continua, estas fuentes son inagotables a escala humana, aunque en el caso de la biomasa, esto es así siempre que se respeten los ciclos naturales [11].

Energía solar fotovoltaica:

La energía solar fotovoltaica es una tecnología que genera por medio de semiconductores iluminados por una cierta cantidad de fotones corriente continua [12].

Reutilización de agua lluvia:

Es un sistema el cual consiste en captar el agua lluvia dependiendo de la climatología del sector [13].

MARCO TEÓRICO.

Vivienda Modular.

Inicialmente, un sistema relacionado con la estructura y la funcionalidad se le atribuye a la definición de modular, adicionalmente que permite la flexibilidad de sus componentes debido a que pueden separarse y recombinarse. Antiguamente, el concepto de modularidad era utilizado para la construcción de templos y columnas como lo fue en el imperio romano. Entre 1919-1933 el arquitecto alemán Walter Gropius planteo la noción de construcción modular y lo desarrollo más a fondo en la década de 1960, donde utilizaba materiales prefabricados para dar a solución a diseños estándares [14].

Las viviendas modulares se caracterizan por su enfoque en la facilidad de ensamblaje y la flexibilidad en el armado y montaje. Una de sus ventajas más importantes radica en que todos sus materiales son reciclables, contribuyendo así a la preservación del medio ambiente [15].

Así mismo el diseño de una vivienda tipo modular tiene características como la facilidad de transporte, desarmado y reorganización de las estructuras modulares y por consiguiente permite su reutilización al generarles un nuevo uso diferente para el que fueron fabricados [15].

Un término similar a la construcción modular es el de prefabricación, esta se denomina como construcción externa, la cual utiliza componentes y estructuras prefabricadas que se pueden integrar antes de su instalación [16].

Energía solar fotovoltaica.

Historia de la energía solar fotovoltaica.

En el siglo XIX se descubrió el impacto fotovoltaico (Becquerel, 1839), en 1954 se realizó el primer dispositivo funcional a partir de una célula de silicio en EE.UU. Después en 1960 el físico Shockley desarrollo la teoría fundamental de la célula solar, la cual fue implementada en satélites artificiales. En 1972 varios gobiernos

industrializados empezaron programas para la aplicación de energías renovables[12].

Posteriormente en América y Europa se mejoraron los procesos en temas de desarrollo y producción y así mismo la industria Japonesa empezó la producción de módulos convencionales de silicio cristalino para aplicaciones a pequeña escala[12].

En los años 80, la energía solar fotovoltaica se destacaba por su notable competitividad en áreas como iluminación y comunicaciones. En este tiempo, la mayoría de estas instalaciones tenían una capacidad alrededor de 100 veces menor a lo requerido para abastecer una vivienda promedio en el mundo desarrollado. Estas iniciativas eran comúnmente financiadas por agencias internacionales de ayuda. Aunque se presentaron fallos en varios aspectos, estos fueron escasos en ámbito técnico, ya que raramente se presentaron fallos en los módulos solares [12].

En la actualidad, la energía solar fotovoltaica ha evolucionado hasta convertirse en una alternativa muy viable para las regiones menos desarrolladas, principalmente debido a las deficiencias en sus infraestructuras eléctricas. Esto la convierte en una elección más técnica y económica, al no estar sujeta a fluctuaciones del precio del combustible[12].

Sistema solar fotovoltaico.

La energía solar fotovoltaica por medio de semiconductores produce corriente continua, esto ocurre cuando la luz solar incide sobre una célula solar [12]. Por otra parte, la tecnología fotovoltaica ofrece varias aplicaciones, especialmente para satisfacer las necesidades de aquellos que carecen de una infraestructura eléctrica, conocidos como sistemas fotovoltaicos autónomos. Asimismo, se utiliza también para generar energía conectada a una red eléctrica ya establecida, denominándose como sistemas fotovoltaicos conectados a la red [17].

En la

Tabla 1, se pueden observar algunas de las ventajas y desventajas del sistema fotovoltaico.

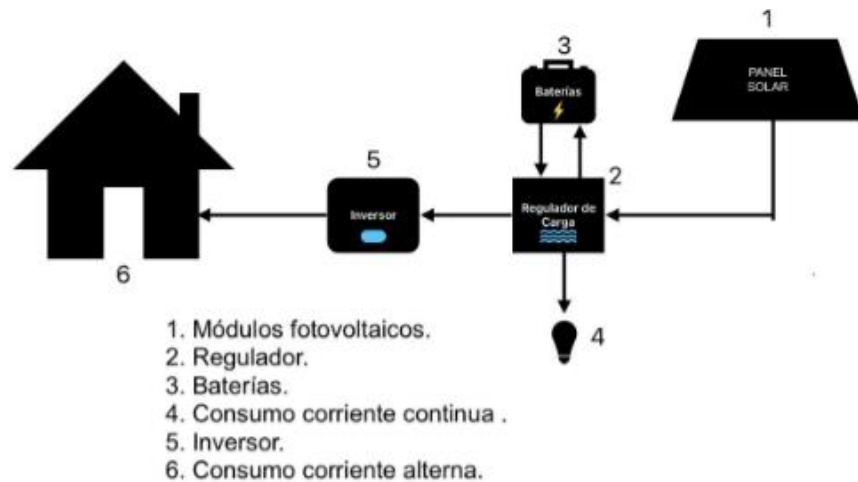
Tabla 1. Ventajas y Desventajas Sistemas Fotovoltaicos.

Ventajas	Desventajas
• Fiabilidad • Durabilidad • Bajo costo de mantenimiento • Reducción en la contaminación sonora • Modularidad • Independencia • Buen desempeño a altas elevaciones	• Hay un costo inicial • Variabilidad de la irradiación • Altos costos en almacenamiento de energía

Fuente: Manual de diseño e instalación [18].

Existen varios elementos que conforman el sistema fotovoltaico, como se puede observar en la Figura 1.

Figura 1. Elementos del sistema solar fotovoltaico.



Fuente: Autor [18].

Inicialmente lo conforma el generador fotovoltaico, el cual capta la radiación solar y la transforma en energía. Existen varios tipos de módulos fotovoltaicos y entre los más comunes se pueden encontrar los siguientes:

- Monocristalino: Principalmente se obtiene de silicio puro fundido y dopado con boro. En sus células presenta azules homogéneos y su conexión es individual y el rendimiento de laboratorio es del 20% [19].
- Policristalino: Se constituye por silicio puro, pero se disminuye el número de fases de cristalización, sus cristales contienen distintos tonos azules. El rendimiento de laboratorio es del 24% [19].
- Amorfo: Posee la ventaja de depositarse en forma de lámina delgada y sobre un sustrato como plástico o vidrio. Es de color marrón y no tiene conexión visible entre las células. El rendimiento de laboratorio es del 16% [19].

Los módulos fotovoltaicos se conectan a un regulador para un correcto funcionamiento. La función principal es evitar sobre descargas y cargas en la batería, contribuyendo así a prolongar su vida útil. Además, el regulador actúa como

amortiguador y de esta forma mitiga fluctuaciones de tensión asociadas a variaciones de temperatura. Asimismo, alimenta equipos que funcionan con corriente continua (DC) como es el caso de pequeñas instalaciones [19].

Por otro lado, también se generan varios consumos de corriente alterna (AC) por lo que es necesario un Inversor que realiza la conversión de DC/AC, igualmente permite la modulación de onda alterna de salida y regula la tensión de salida. Estos pueden trabajar conectados tanto a baterías como a módulos fotovoltaicos e inyectar energía a la red eléctrica [17].

Finalmente, como se ilustra en la Figura 1.

Figura 1, la energía que produce los paneles fotovoltaicos se almacena en las baterías. Esto se debe a que durante la noche no hay generación de energía por parte de los paneles solares, por lo que es esencial acumular energía durante el día, cuando la generación es abundante. Igualmente, las baterías pueden emplearse para estabilización de voltaje o corriente y suministro de picos de corriente. Es importante destacar que este componente suele ser parte integral de sistemas autónomos [17].

Sistema de reutilización de agua lluvia.

El sistema de reutilización de agua se presenta como una alternativa sostenible y confiable para abordar el crecimiento de la demanda de agua en los hogares. La lluvia, como un recurso natural, puede ser aprovechada para varias aplicaciones diarias que no requieren de agua potable de alta calidad. Esto hace que sea una opción viable, especialmente en áreas donde el acceso al agua es limitado. La captación y almacenamiento del agua lluvia para su posterior distribución en las actividades que se desee se vuelve común en estos contextos[20]. Para la distribución usualmente se realiza por gravedad y con la factibilidad de utilizar bombas a motor, arietes o ruedas hidráulicas.

Los sistemas que utilizan el agua lluvia para el suministro de agua, se componen de varios elementos para captar, conducir, filtrar, almacenar y distribuir. En la Tabla 2, se indican algunas ventajas y desventajas de este sistema.

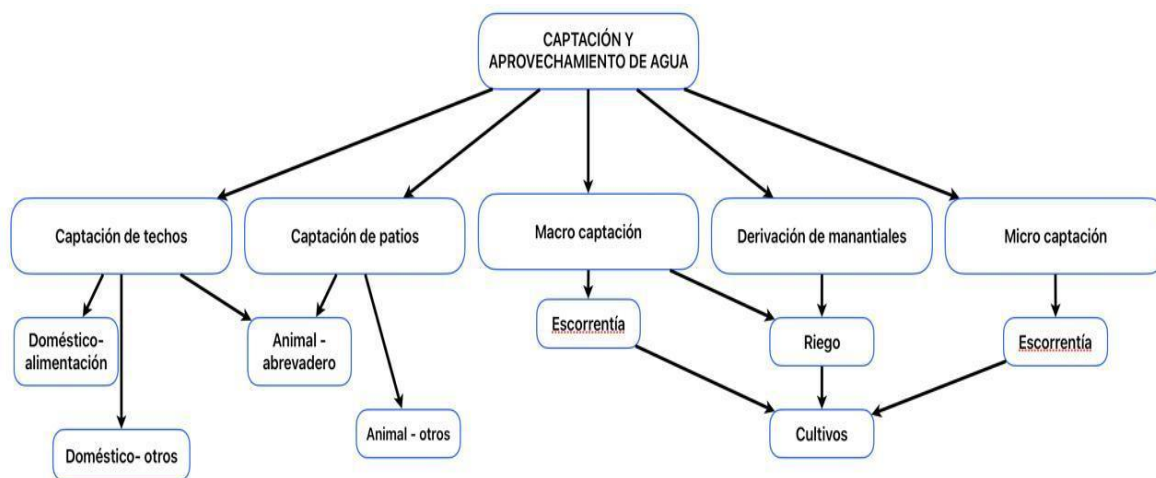
Tabla 2. Ventajas y desventajas del sistema de reutilización de agua lluvia.

Ventajas	Desventajas
• No hay interrupciones en la red abasto. • Reduce el escurrimiento y erosión. • Independiente de servicios públicos. • Libre de cloro y subproductos. • Agua pura.	• Agua lluvia no es controlable durante época de sequías. • Materias orgánicas. • Contaminar por animales. • Contaminantes atmosféricos.

Fuente: La captación del agua de lluvia como solución en el pasado y el presente [20].

Como se indica en la Figura 2, existen varias técnicas para la captación de agua lluvia y así aumentar la disponibilidad para lo que sea requerido.

Figura 2. Modalidades de captación de agua según su finalidad.



Autores: Captación y almacenamiento de agua lluvia [21].

Metodología de matriz pugh y proceso analítico jerárquico.

La metodología de matriz pugh se realiza mediante una matriz de decisión en la cual se genera una evaluación entre un conjunto de criterios pre establecidos por el diseñador y así se establece la mejor opción. Además, cada criterio establecido presenta una ponderación diferente, la cual se asigna en una escala del 0 al 100 según corresponda [22].

Luego, se les asigna un valor a cada alternativa de acuerdo al funcionamiento que se espera de cada criterio. Por lo cual, se asigna un valor de 1 si se aprueba satisfactoriamente el criterio, 0 si se aprueba el criterio y -1 si no se aprueba el criterio [22].

Para determinar el valor de ponderación dado a cada criterio se utilizó el proceso analítico jerárquico, un método matemático que sirve para evaluar criterios, en este se analiza el efecto de los cambios de un nivel superior sobre uno inferior. Inicialmente se usa el principio de descomposición, en donde se estructura a los criterios de acuerdo con las escalas de se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Escala de principio de descomposición.

Calificación Numérica	Planteamiento Verbal	Explicación
9	Extremadamente preferible	La evidencia favorece en la más alta medida.
7	Muy Fuertemente preferible	Un criterio es favorecido muy fuertemente sobre el otro. En la práctica se puede mostrar su dominio
5	Fuertemente preferible	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un criterio frente al otro
3	Moderadamente preferible	La experiencia y el juicio favorecen un poco a un criterio frente al otro
1	Igualmente, preferible	Los dos criterios contribuyen igual al objetivo

Fuente: El proceso analítico jerárquico y la toma de decisiones multicriterio [23].

En la Tabla 4, se muestra una matriz de comparación entre los criterios, en donde si frente un criterio, una alternativa A es n veces mejor que B, entonces B es $1/n$ veces mejor que A y esto garantiza que el análisis se haga de manera bidireccional [23].

Tabla 4. Matriz de comparación.

Criterios de Evaluación	Alternativa A	Alternativa B
A	1	$1/n$
B	n	1
Total	Total	Total

Fuente: El proceso analítico jerárquico y la toma de decisiones multicriterio [23].

ESTADO DEL ARTE.

Se conoce como vivienda modular, a la que fabrican módulos para luego transportarse al terreno donde luego se ensamblarán trayendo comodidad y adaptabilidad. La idea de crear este tipo de vivienda surge en Estados Unidos en 1908 cuando Sears Roebuck & Company comenzó a fabricar y vender estas casas por paquetes o kits con sus instrucciones de armado [23].

Los proyectos que buscan la sostenibilidad en las viviendas a nivel nacional son diferentes, ya que es necesario para aquellas zonas donde no llega la energía eléctrica o es muy costosa, incluso en zonas altamente vulnerables donde la construcción de un hogar se torna difícil y costosa. Conceptos Plásticos promueve el uso de plásticos desechados para elaborar ladrillos para fabricar casas confortables y seguras [24]. Como es el caso de CASA Tenjo, la primera vivienda sostenible certificada en CASA Colombia por su construcción sostenible y reducción en el consumo de agua, energía y materiales contaminantes, además de tener una responsabilidad social adecuada para una comunidad altamente afectada [25].

La instalación de estas viviendas que a su vez funcionen con energía sostenible y cuente con un sistema de reutilización de agua no es común en el país. En Barcelona, la empresa Construimos Tu Casa fabrica y tiene un sistema de generación de energía eléctrica mediante paneles solares instalados en el techo de las casas generando menor impacto al medio ambiente, pero solo buscan el suministro de agua por pozos según el tipo de suelo donde se instalará la vivienda [26]. Empresas de reutilización de agua y tienen un suministro de agua por pozos.

PARÁMETROS INICIALES.

1.1 PARÁMETROS NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO.

Para desarrollar el proyecto se consideraron varias condiciones iniciales para solucionar cada objetivo propuesto.

1.1.1 Características de Cartagena del Chairá-Caquetá.

Se determinaron las características de la región y se identifican en la Tabla 5, donde evidencia la ubicación geográfica en coordenadas, la irradiación solar más baja mensual a lo largo del año, la hora solar pico, temperatura ambiente máxima y mínima promedio. Dichos datos fueron obtenidos por medio de la herramienta "Prediction Of Worldwide Energy Resources" de la NASA [24].

Tabla 5. Características de la región.

Características	Valor
Latitud °	1,3345179
Longitud °	-74,8414067

Irradiación ($\frac{kWh}{m^2}/día$)	3,67
Temperatura máxima (°C)	33
Temperatura mínima (°C)	18

Fuente: Autor.

1.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE LA POBLACIÓN.

Con el propósito de obtener información relacionada a las condiciones de vida de las familias de Cartagena del Chairá-Caquetá, se llevó a cabo una encuesta a una muestra de 179 habitantes de una población de 31.151 habitantes, según datos proporcionados por el DANE [25]. De acuerdo con los resultados de esta muestra, se puede afirmar con un nivel de confianza del 85% que la información recopilada brinda una representación estadística significativa de las condiciones de vida en la región.

Las encuestas se hicieron de manera presencial y aleatoria, diligenciadas en papel y posteriormente los datos fueron compilados en tablas de Excel como se muestra en el Anexo B para su posterior análisis.

1.2.1 Cantidad de habitantes por vivienda.

El 59 % asegura que en su hogar viven 2, 3 o 4 personas, el resto de la población vive sola o habita hogares con 5 o más personas.

Se formuló la pregunta ¿Con cuantas personas habita en su hogar? y los resultados se presentan en la tabla 1. En donde se muestra que la mayoría de la población (59 %) asegura que en su hogar viven 2, 3 o 4 personas, el resto de la población vive sola o habita hogares con 5 o más personas.

1.2.2 Habitantes con vivienda propia.

Con el fin de enfocar el proyecto a la población que no tiene la capacidad de adquirir una vivienda propia (VP) se les realizó a los encuestados la siguiente pregunta: ¿Cuenta actualmente con vivienda propia? Como se muestra en la Tabla 6, 77

habitantes manifestaron no tener vivienda propia y esto corresponde al 43% del total de encuestados.

Al contrastar la información sobre las personas que no tienen vivienda propia con el número de habitantes por vivienda, se concluye que el 26 % de los encuestados no cuenta con vivienda propia (NVP) y habita hogares donde viven 2, 3 o 4 personas. Este 26 % del total de encuestados corresponde al 46 % de los que NVP.

Como se busca impactar a la mayor cantidad de personas posible, se decidió que el proyecto debe apuntar a la selección de una vivienda que acoja por lo menos a 4 personas para que satisfaga al 46 % de la población que no cuenta con vivienda propia.

Tabla 6. Habitantes por vivienda.

Habitantes por vivienda	No. Habitantes	Frecuencia relativa	No. Habitantes (NVP)	Frecuencia relativa (NVP)
1	13	7%	8	4%
2	20	11%	11	6%
3	39	22%	16	9%
4	46	26%	19	11%
5 o más	61	34%	23	13%
TOTAL	179	100%	77	43%

Fuente: Autor.

1.2.3 Ingresos mensuales de los habitantes.

Debido a que los ingresos mensuales de los habitantes es un factor por el cual no pueden adquirir una vivienda propia, se les preguntó a los encuestados: ¿Cuánto es su ingreso mensual? Y el resultado se muestra en la Tabla 7. El 56 % de las personas encuestadas tiene un ingreso menor a 1000.000 \$COP y el 10 % gana más de 2000.000 \$COP, valores similares a la población que NVP reflejado en la columna 3. Por este motivo, se decidió que el proyecto se enfatizará en las personas

que no poseen el sustento necesario para comprar una vivienda y esto es debido a que aproximadamente el 62% de la población del municipio de Cartagena de Chairá vive en condiciones de pobreza según una encuesta de caracterización socioeconómica, cultural y ambiental en Colombia [26].

Tabla 7. Ingresos mensuales de los habitantes

Ingresos mensuales (\$COP)	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa (NVP)
Menos de 1.000.000 \$	56%	58%
Entre 1.000.000\$ - 2.000.000\$	32%	35%
Entre 2.000.000\$ - 3.000.000\$	7%	5%
Más de 3.000.000\$	3%	1%
Ningún ingreso	1%	0%

Fuente: Autor.

1.2.4 Cortes de energía eléctrica.

A las personas encuestadas se les formuló la pregunta ¿Ha habido algún momento en el último mes que en su hogar haya fallado el servicio de energía eléctrica? En la Tabla 8 se observan los resultados. El 90% de las personas encuestadas presentan 3 o más cortes en la energía eléctrica mensualmente y esto es debido a que según el Censo Nacional de Población y Vivienda del 2018, tan solo se presenta un 63,7 % de cobertura del servicio de energía eléctrica en el municipio[27] y el 10% restante presenta máximo 2 cortes de energía.

Tabla 8. Corte de energía eléctrica.

Cortes en la energía eléctrica	Frecuencia relativa
No hay cortes.	8%

Si, en al menos una ocasión.	1%
Si, en al menos dos ocasiones.	1%
Si, en tres o más ocasiones.	90%
TOTAL	100%

Fuente: Autor.

1.2.5 Electrodomésticos presentes en la vivienda.

El consumo eléctrico en una vivienda se genera según el uso de los diferentes electrodomésticos de las personas en su hogar, por lo que a los encuestados se les preguntó: ¿Con qué electrodomésticos cuenta su hogar si tuvieran energía constante? y los resultados se muestran en la Tabla 9. En la primera columna se observa los electrodomésticos de mayor ocupación por los habitantes de la región, por lo que se deduce que éstos son de uso básico, dicho esto, el 37% cuenta con televisor, licuadora, lavadora y nevera. Por tal motivo se concluye que el resto de población no tiene el poder adquisitivo para obtener todos los electrodomésticos de uso básico en su diario vivir.

Tabla 9. Electrodomésticos comunes en el hogar.

Electrodomésticos en el hogar	No. Habitantes	Porcentaje relativo.
Televisor.	158	88%
Licuadora.	126	70%
Lavadora.	96	54%
Nevera.	152	85%
televisor, licuadora, lavadora y nevera.	67	37%
otro.	15	8%
ninguno.	3	2%

Fuente: Autor.

DETERMINACIÓN VIVIENDA MODULAR

Inicialmente, se llevó a cabo una investigación sobre la construcción modular y prefabricada en Colombia, a partir de la cual se preseleccionaron 5 empresas teniendo en cuenta los siguientes aspectos: la cantidad de personas para las que está diseñada, la adaptabilidad al tipo de clima, la posibilidad instalar un sistema de energía renovable, la posibilidad de ampliación y los acabados.

2.1 SELECCIÓN DE LA VIVIENDA.

Se preseleccionaron cinco tipos de vivienda de las empresas Vimob (Vivienda1), Kazasul (Vivienda2), Casas prefabricadas s.a.s (Vivienda 3), Cadecol (Vivienda 4) y Forandes (Vivienda 5). Estas fueron evaluadas mediante la metodología de Matriz Pugh [22]. Para la cual se determinaron los siguientes criterios de selección con su respectivo peso de valoración:

- Costos: Se determinó que el costo debe ser mínimo, para que sea asequible para la población. (25%)
- Área útil: Hace referencia a la superficie que podrán ocupar las personas que habiten la vivienda. (45%)
- Tiempo de desarrollo: Es el tiempo que dura la construcción y su ensamblaje en el lugar donde se va a instalar. (10%)

Tabla 10 .Características de las viviendas modulares.

Criterios de evaluación	Vivienda 1	Vivienda 2	Vivienda 3	Vivienda 4	Vivienda 5
Costos (\$COP)	193.000.000	66.030.000	27.000.000	43.857.000	79.900.000
Área útil (m ²)	66,5	42,6	60	45	49
Tiempo de desarrollo (semanas)	4	12	12	12	4

Fuente: Autor.

Seguidamente las viviendas fueron evaluadas bajo la metodología de matriz pugh con los criterios establecidos y los resultados se muestran en la Tabla 6. La vivienda 1 quedó descartada debido a su alto costo por lo cual obtuvo una puntuación negativa, por otro lado, las viviendas 2 y 4 obtuvieron un puntaje de apenas 8 debido a que el tiempo de desarrollo es elevado y el área útil es inferior a la requerida para el número de habitantes.

Por otro lado, la vivienda 3 fue la que se seleccionó para el proyecto al cumplir con el 66 de la valoración total, sin embargo, la Vivienda 5 al cumplir también con la mayoría de los criterios con un puntaje de 40 es una candidata aceptable para el proyecto.

Tabla 11 Evaluación por matriz pugh de las viviendas preseleccionadas.

Criterios de evaluación	Valoración (%)	Vivienda 1	Vivienda 2	Vivienda 3	Vivienda 4	Vivienda 5
Costos (\$COP)	53	-1	1	1	1	1
Área útil (m ²)	29	1	-1	1	-1	-1
Tiempo de desarrollo (semanas)	16	1	-1	-1	-1	1
TOTAL	100	-8	8	66	8	40

Fuente: Autor.

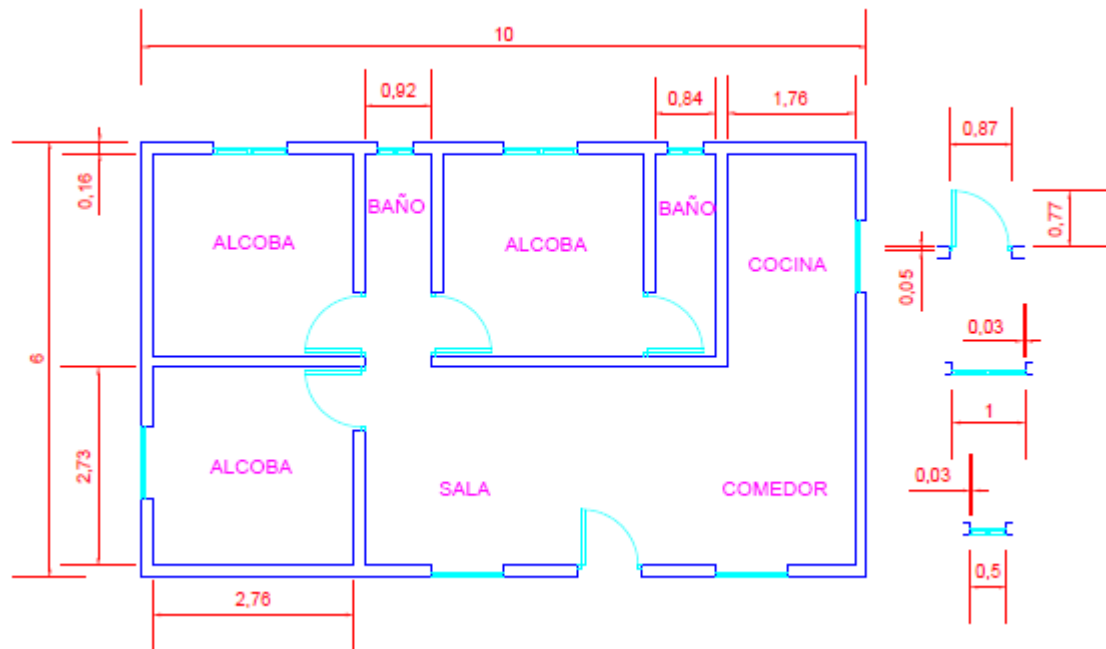
Finalmente, dado a que la vivienda seleccionada fue la Vivienda 3, se va usar un área de 60 metros cuadrados, para alojar 4 personas como se indica en la sección 1.2.2. Es importante recalcar que diversas especificaciones pueden variar según los criterios del cliente. Por ejemplo, la altura de la vivienda puede adaptarse a las normativas del Ministerio de Vivienda de Colombia para climas cálidos, que establece una altura mínima es de 2,30 metros [28].

Por otro lado, según un documento técnico de parametrización para viviendas rurales de subsidio familiar, la altura máxima podría alcanzar hasta 3,70 metros, considerando las condiciones climáticas y el diseño que garantice el confort térmico en el interior de la vivienda [29].

2.2 DIAGRAMA DE LA VIVIENDA SELECCIONADA.

Finalmente, ya seleccionados los parámetros de la vivienda, se realizó un plano y se muestra en la figura 3.

Figura 3. Plano de la vivienda seleccionada



Fuente: Autor.

DISEÑO SOLAR FOTOVOLTAICO

3.1 DEMANDA ENERGÉTICA.

Para conocer el consumo total diario (CTD) de la región, primero se realizó una revisión bibliográfica en la cual según la IPSE a 205 usuarios se le suministran 625 KWh de energía diaria en Remolino del Caguán una de las localidades de Cartagena de Chaira[30], esto quiere decir que aproximadamente por usuario hay un consumo de 3 KWh. Sin embargo, debido a que la información sobre CTD no se encuentra generalizada puesto que, no hay bases de datos, se decidió establecer un consumo a partir de los electrodomésticos que podría llegar a tener un hogar en la región de acuerdo con una ficha de caracterización de consumo de energía eléctrica de un hogar promedio en Colombia [15], como se muestra en la Por otro lado, la bomba hidráulica que se muestra se va a utilizar en un sistema de reutilización de agua.

Tabla 12 Consumos eléctricos de una vivienda.

Electrodomésticos	N° de equipos	Potencia (Watts)	Horas de uso al mes	W h/día
Bomba hidráulica	1	250	9	75
Nevera	1	180	300	1800
Lavadora	1	750	12	300
Televisor 20"	1	75	180	450
Equipo de sonido	0	150	60	0
Computador de mesa	1	140	60	280
Bombillos AHORRADOR	8	15	120	480
Plancha de ropa	0	1000	12	0
Computador portátil	0	120	60	0

Cargador de celular conectado	3	12	16	19,2
Cargador de celular desconectado	3	5	16	8
Licuada	1	400	15	200
Ventilador	1	100	360	1200

Fuente: Ficha de caracterización de consumo de energía eléctrica de un hogar promedio en Colombia [15].

3.2 ESTIMACIÓN DEL CONSUMO ELÉCTRICO.

Inicialmente a partir de las encuestas realizadas y del estudio bibliográfico del suministro energético de la región se obtuvo el dato aproximado del consumo y de los tipos de electrodomésticos que los habitantes poseen en sus viviendas.

Seguidamente se realizó el cálculo del consumo eléctrico diario (CTD) en la ecuación (1) con los datos obtenidos y mediante una ficha de caracterización de consumo de energía eléctrica de un hogar promedio en Colombia [31].

$$CTD = \text{Equipos} * \text{Horas de uso} * \text{Potencia} = \frac{(21 * 1220 \text{ horas} * 3197 \text{ W})}{30 \text{ días}} = 4812 \frac{\text{Wh}}{\text{día}} \quad (1)$$

Donde Equipos son los electrodomésticos de la vivienda, *Horas de uso* son las horas de uso al mes de los electrodomésticos y *Potencia* es la potencia eléctrica de los electrodomésticos.

3.3 RENDIMIENTO GLOBAL DE LA INSTALACIÓN.

Un sistema solar fotovoltaico suele presentar pérdidas de potencia en el rendimiento global de la instalación, por este motivo se utilizó un factor de seguridad del 20% que es recomendado en instalaciones comerciales [32] por ser conservador. Por tal motivo el CTD se corrigió utilizando este factor de seguridad. Como se muestra en la ecuación (2):

$$E_n = CTD * 20\% = 4812 \frac{\text{Wh}}{\text{día}} * 20\% = 5774 \text{ Wh} \quad (2)$$

En donde, E_n es la energía necesaria del sistema fotovoltaico.

3.4 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.

3.4.1 Selección de módulos.

Inicialmente se hizo una preselección de 5 módulos fotovoltaicos: módulo 1 (PS 150W 12V policristalino) (auto solar), módulo 2 (PS 200W 12V policristalino) (solartex), módulo 3 (PS 340w 24v monocristalino) (auto solar), módulo 4 (PS 455W 24V monocristalino) (auto solar) y módulo 5 (PS 400W monocristalino) (emergente) cuyas características se pueden observar en la Tabla 13

Tabla 13 Características de los módulos fotovoltaicos.

Criterios de evaluación	Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3	Módulo 4	Módulo 5
Costos (\$COP)	\$340.750,00	\$330.000,00	\$615.938,00	\$619.472,00	\$734.000,00
Potencia máxima (Watts)	175	200	350	465	400
Coefficiente -eficiencia (%)	0,18	0,15	0,21	0,20	0,21
Peso (kg)	11	13	18,7	25	21
Área (m ²)	0,9	1,2	1,6	2,2	1,9

Fuente: Autor.

Posteriormente mediante las características descritas, los módulos fueron evaluados bajo la metodología mencionada en la sección 0 con criterios establecidos, como se observa en la Tabla 14 . Los módulos 1 y 2 quedaron descartados por su baja potencia y eficiencia. Los módulos 3 y 4 presentan costos, áreas y pesos elevados, por lo que su puntuación es muy baja. Y finalmente se seleccionó el módulo 5 que cumple con la mayoría de los criterios.

Tabla 14 Evaluación por matriz pugh de los módulos preseleccionados.

Criterios de evaluación	Valoración (%)	Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3	Módulo 4	Módulo 5
Costos(\$COP)	21	1	1	-1	-1	-1
Potencia máxima(W)	38	-1	-1	0	1	1
Coefficiente-eficiencia	21	0	-1	1	1	1
Peso (kg)	10	1	1	0	-1	-1
Área (m^2)	10	1	0	0	-1	0
TOTAL	100	3	3	-2	2	4

Fuente: Autor.

3.4.2 Cálculo de horas solar pico.

Se calcularon las horas solar pico (HSP) por medio de la ecuación (3), donde se usó la irradiación solar más baja anual (IMB) como se puede ver en la Tabla 5.

$$HSP = \frac{IMB}{1 \frac{Kw}{m^2}} = \frac{3,67 \frac{Kwh}{m^2}}{1 \frac{Kw}{m^2}} = 3,67 \frac{h}{día} \quad (3)$$

3.4.3 Cantidad de módulos.

De acuerdo con la Potencia del panel (Pp) seleccionado y con el dato de HSP, se determinó la energía que genera el panel (Ep) en la ecuación (4).

$$Ep = Pp * HSP = 400W * 3,67 \frac{h}{día} = 1468 W \frac{h}{día} \quad (4)$$

Posteriormente con el dato obtenido anteriormente se calculó el número de paneles que necesita el sistema fotovoltaico en la ecuación (5).

$$N^{\circ} \text{ Paneles} = \frac{En}{Ep} = \frac{5774 Wh}{1468 W \frac{h}{día}} = 4 \text{ paneles} \quad (5)$$

3.4.4 Tensión e intensidad de los módulos.

Debido a que las condiciones climáticas de la región perjudican el desempeño normal de los módulos, se calculó el comportamiento de la temperatura máxima y mínima que se muestra en la sección 0 en las siguientes características: temperatura de la célula, corriente de corto circuito, voltaje de circuito abierto, corriente y voltaje en maximum power point (MPP). Estos cálculos se pueden observar en las ecuaciones (6) a (10).

$$T_c = T_a + (T_{c_n} - 20^\circ\text{C}) * \frac{E}{800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \quad (6)$$

Donde, T_c es la temperatura de la célula, T_a es la temperatura ambiental, T_{c_n} es la temperatura de la célula en condiciones nominales y E es la radiación solar

$$I_{cco} = I_{ccp} * \left(1 + \left(\frac{K_{cc}}{100}\right) * (T_c - 20^\circ\text{C})\right) * \frac{E}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \quad (7)$$

Donde, I_{cco} es la corriente de corto circuito, I_{ccp} es la corriente de corto circuito proveedor y K_c es el coeficiente de temperatura de corto circuito.

$$V_{cao} = V_{cap} * \left(1 + \left(\frac{K_{ca}}{100}\right) * (T_c - 25^\circ\text{C})\right) \quad (8)$$

V_{cao} = Tensión de circuito abierto, V_{cap} es el voltaje de circuito abierto proveedor, V_{cap} es el voltaje de circuito abierto proveedor y K_{ca} es el coeficiente de temperatura de tensión de corto circuito proveedor.

$$I_{pmp} = I_{mp} * \left(\left(1 + \left(\frac{K_{cc}}{100}\right) * (T_c - 25^\circ\text{C})\right) * \frac{E}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}\right) \quad (9)$$

Donde, I_{pmp} es la corriente de MPP y I_{mp} es la corriente de MPP proveedor.

$$V_{pmp} = V_{mp} * \left(1 + \left(\frac{K_{ca}}{100}\right) * (T_c - 25^\circ\text{C})\right) \quad (10)$$

V_{pmp} es el voltaje de MPP y V_{mp} es el voltaje de MPP proveedor.

En la Tabla 15, como se mencionó anteriormente, se muestra los resultados del comportamiento de la temperatura máxima y mínima de la región en la operatividad de los módulos fotovoltaicos. Los valores son en base a cálculos realizados con las Ecuaciones (6) a (10). Por otro lado, en la columna 6 se ve que los valores de 11,80 (A) y 11,87 (A) no son tan alejados del valor de corriente (I_{pmp}) máximo que genera el panel en condiciones estándar (STC), lo mismo sucede con los valores de voltaje (V_{pmp}).

Tabla 15. Características operativas del módulo seleccionado.

Condiciones Ambientales			Características del módulo fotovoltaico			
Estado	Temperatura(°C)	E(W/m ²)	I _{cco} (A)	V _{cao} (V)	I _{pmp} (A)	V _{pmp} (V)
STC	-6,25	1000	12,3	41,2	11,70	34,2
Tmin	18	1000	12,4	39,0	11,80	32,3
Tmax	33	1000	12,5	37,4	11,87	31,1

Fuente: Autor.

3.5 INVERSOR.

3.5.1 Selección del inversor.

En la ecuación (11), se calculó la potencia del inversor en donde el ratio de conversión entre corriente continua y alterna (SR_{AC}) es 1,1 [33] y Ep es la energía que genera el panel.

$$P_{inv} = \frac{Ep}{SR_{AC}} = \frac{1468 \text{ W} \frac{h}{dia}}{1,1} = 1335 \text{ W} \quad (11)$$

Posteriormente, se realizó una preselección de 4 inversores: inversor 1 (inversor híbrido Green point) (Auto solar), inversor 2 (MIC 1500TL-X) (Suneo), inversor 3 (PV3000 VHM Series) (Auto solar), inversor 4 (PV3000 LMPK Series) (Netion) y sus

características se pueden observar en la Tabla 16. Y se utilizaron los siguientes criterios para su evaluación con su respectivo peso de valoración:

- Potencia máxima: Valor calculado en la ecuación 11 y se debe tener un valor cercano a este. (46%)
- Eficiencia: Se requiere una eficiencia elevada para que se aproveche la mayor energía posible. (27%)
- Costo: El costo debe ser mínimo para que sea asequible. (27%)

Tabla 16. Características de los inversores seleccionados.

Criterios de evaluación	Inversor 1	Inversor 2	Inversor 3	Inversor 4
Potencia máxima de salida (W)	1500	1500	1500	1500
Eficiencia (%)	85%	97%	95%	88%
Costos (\$COP)	2.135.803	2.127.990	2.071.552	2.289.000

Fuente: Autor.

Para finalizar se seleccionó el inversor utilizando la metodología descrita en la sección 0, como se observa en la Tabla 17. El inversor 1 obtuvo una calificación del 38 debido a que satisface la potencia requerida que se muestra en la sección 7.1. Los inversores 2 y 3 presentan un alto costo por lo que fueron descartados y el inversor 4 presentó una eficiencia baja con respecto a los otros inversores por lo que se descartó.

Tabla 17. Evaluación por matriz pugh de los inversores preseleccionados.

Criterios de evaluación	Valoración (%)	Inversor 1	Inversor 2	Inversor 3	Inversor 4
Potencia máxima de salida(W)	54	1	0	0	0
Eficiencia (%)	30	0	0	1	-1
Costo(\$COP)	16	-1	-1	-1	1
TOTAL	100	38	-16	14	-14

Fuente: Autor.

3.5.2 Límites de tensión.

La tensión del sistema fotovoltaico es la sumatoria de las tensiones de los módulos que se conectan en serie al inversor [33], por este motivo se calculó la cantidad máxima y mínima de módulos que el inversor soporta respetando el MPP como se muestra en las ecuaciones (12) y (13).

$$N^{\circ}_{maxs} = \frac{V_{mpps_{sup}}}{V_{pmp}(Tmin)} = 12 \text{ módulos} \quad (12)$$

$$N^{\circ}_{mins} = \frac{V_{mpps_{inf}}}{V_{pmp}(Tmax)} = 2 \text{ módulos} \quad (13)$$

En donde, N°_{maxs} es el número máximo de módulos, N°_{mins} es el número mínimo de módulos, $V_{mpps_{sup}}$ es el límite tensión superior en MPP del inversor, $V_{mpps_{inf}}$ es el límite tensión inferior en MPP del inversor, $V_{pmp}(Tmax)$ es el voltaje del módulo en MPP en temperatura máxima y $V_{pmp}(Tmin)$ es el voltaje del módulo en MPP en temperatura mínimo.

En la ecuación (14) se calculó el número de módulos adecuado que se debe instalar en el inversor.

$$N^{\circ}_{ma} = \frac{V_{eca}}{V_{oc}(Tmin)} = 4 \text{ módulos} \quad (14)$$

Finalmente se puede decir que los módulos pueden ser conectados en serie y en paralelo dependiendo de las variables de corriente y voltaje de entrada del inversor, como se muestra en la ecuación (15), (16) y (17).

$$Roi_i < V_{pmp} * 4 \text{ modulos} < Roi_s = 34 V < 124,4 V < 150 V \quad (15)$$

$$Roi_i < V_{pmp} * 2 \text{ modulos} < Roi_s = 34 V < 62,2 V < 150 V; \quad (16)$$

$$I_{pmp} * 2 < Cc_{in} = 23,74 A < 60 A \quad (17)$$

Roi_i es el rango de operación del inversor inferior, Roi_s es el rango de operación del inversor superior y Cc_{in} es la corriente de carga del inversor.

Los módulos se pueden conectar de acuerdo con las variables de corriente y voltaje de entrada del inversor y de los módulos, como se muestra en las ecuaciones (15) y (16).

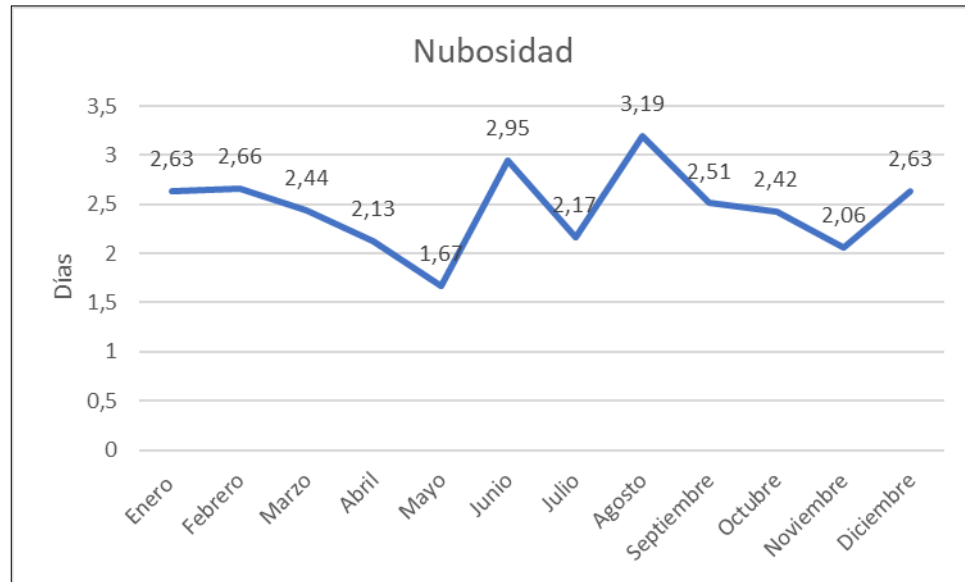
De acuerdo con lo anterior se decidió seleccionar la conexión mixta de módulos al inversor debido a que pueden seguir en operación en caso de que algún módulo presente alguna novedad y por otro lado, se garantiza un flujo correcto de corriente y asegura el funcionamiento del sistema [34].

3.6 BATERÍAS.

3.6.1 Nubosidad.

Teniendo en cuenta la climatología de la región se obtuvieron los datos de nubosidad a lo largo del año, esto con el fin de conocer los días en que se genera la menor irradiancia y de esta forma se determinó el número de días de autonomía que requiere el sistema. De acuerdo con la Gráfica 1, el máximo número de días nublados a lo largo del año es de 3,19 días de acuerdo con la página de la NASA [24] , por lo que se dimensionó a 3 días de autonomía el sistema de baterías. De igual forma, se observa que la mayoría de meses se presentan entre 2 y 3 días nubosidad, estos valores son relativamente bajos y esto genera que el sistema fotovoltaico permanezca con irradiación.

Gráfica 1. Nubosidad de Cartagena del Chairá mensual.



Fuente: Autor con base en Prediction Of Worldwide Energy Resources [24].

3.6.2 Profundidad de descarga y cálculo de las baterías.

De acuerdo con una revisión bibliográfica que se realizó, el rango de profundidad de descarga generalmente es de entre el 60 % y 80 % [35] y se seleccionó un valor promedio del 70 %.

3.6.3 Selección de las baterías.

Con la ecuación (18) se realizó el cálculo de la capacidad total de las baterías (CTB) que se requiere en el sistema.

$$CTB = \frac{E_n * Da}{Pd * V_{ins}} = \frac{5774 \text{ Wh} * 3 \text{ días}}{70\% * 24V} = 1031 \text{ Ah} \quad (18)$$

Da son los días de autonomía, Pd es la profundidad de descarga de la batería y Vins es el voltaje de la instalación.

Se realizó una preselección de 4 baterías: batería 1 (Batería Estacionaria OPzV 2V 1110Ah C100) (Autosolar), batería 2 (Batería Estacionaria OPzS 2V 1520AH VICTRON ENERGY) (Solartex), batería 3 (Batería Estacionaria TAB 8 OPzS 800 1204Ah-Bat Plus) (Baterías industriales), batería 4 (Batería Estacionaria TAB 12

OPzv 1200 Ah -Bat Plus) (Baterías industriales) y sus características se pueden observar en la Tabla 18. Y se emplearon los siguientes criterios de evaluación con su respectivo peso de valoración:

- Capacidad baterías: Valor calculado en la Ecuación 15, se debe tener un valor cercano a este. (45%).
- Durabilidad: Se requiere la mayor vida útil. (26%).
- Costo: El costo debe ser mínimo para que sea asequible. (14%).
- Mantenibilidad: Se busca que no requiera de mantenimiento. (14%)

Tabla 18. Características de las baterías preseleccionadas.

Criterios de evaluación	Batería 1	Batería 2	Batería 3	Batería 4
Costo (\$COP)	\$3.371.667	\$2.679.800	\$2.208.802	\$2.514.406
Capacidad (Amperios)	1110	1520	1204	1200
Durabilidad (semanas)	18	20	20	15
Mantenibilidad	no	si	si	no

Fuente: Autor.

Después las baterías fueron evaluadas bajo la metodología establecido en la sección 0 con criterios establecidos como se observa en la Tabla 19. La batería 1 quedó descartada debido a su alto costo, la batería 2 al tener una baja capacidad y alta mantenibilidad también quedó descartada, por otra parte, las baterías 3 y 4 presentan una puntuación alta debido a que cumplen con la mayoría de criterios. Por lo que finalmente se seleccionó la batería 3 al presentar la mayor puntuación con un 81.

Tabla 19. Evaluación por matriz pugh de las baterías seleccionadas.

Criterios de evaluación	Valoración (%)	Batería 1	Batería 2	Batería 3	Batería 4
Costo	47	-1	0	1	1
Capacidad	28	1	-1	1	1
Durabilidad	16	0	1	1	-1
Mantenibilidad	10	1	-1	-1	1
TOTAL	100	-9	-21	81	68

Fuente: Autor.

Finalmente el número total de baterías a utilizar debe cumplir con el límite de tensión nominal [35].

3.6.4 Cantidad de baterías.

Para la cantidad de baterías que se van a utilizar para el sistema se necesita un total de 2 baterías en serie gracias a que para una potencia del sistema entre 1000W y 5000W se debe cumplir con el límite de tensión nominal del 24V [35] .

3.7 REGULADOR DE CARGA

Selección del regulador.

Se realizó el cálculo de la corriente de entrada del regulador (C_r) tipo MPPT debido a que regula el voltaje de que genera los paneles y así inyecta corriente controladamente para cargar las baterías la mayor parte del tiempo [36]. Este cálculo se observa en la ecuación (19).

$$C_r = I_{scs} * \# \text{modulos serie} = 24,52 \text{ A} \quad (19)$$

Donde, I_{scs} es la corriente de corto circuito del módulo fotovoltaico.

Y finalmente se seleccionó el tipo de regulador con base al dato de corriente de entrada, en donde se usaron los catálogos de fabricantes y se realizó una preselección de 4 reguladores: regulador 1 (Tracer3210AN) (Ubuy), regulador 2 (EcoBoost MPPT) (Syscom), regulador 3 (MSC3210N) (Inge solar), regulador 4 (MPPT 30A ML2430) (Auto solar) y sus características se pueden observar en la Tabla 20. Por otro lado, se emplearon los siguientes criterios de evaluación con su respectivo peso de valoración:

- Protecciones: Entre más protecciones contra sobrecargas hay mayor seguridad para el sistema. (45%).
- Eficiencia: Se requiere una eficiencia elevada para que se aproveche la mayor energía posible. (26%).
- Costo: El costo debe ser mínimo para que sea asequible. (14%).

Tabla 20. Características de los Reguladores preseleccionados.

Criterios de Evaluación	Regulador 1	Regulador 2	Regulador 3	Regulador 4
Costos (\$COP)	978.118	1.337.583	452.414	490.797
Protecciones (#)	11	12	10	11
Eficiencia (%)	99,5	98	99,5	99,9

Fuente: Autor.

Luego, los reguladores fueron evaluados bajo la metodología establecido en la sección 0, como se indica en la Tabla 21. El regulador 2 presenta la menor calificación debido a su elevado costo y una eficiencia baja en comparación con los demás reguladores. Por otra parte, el regulador 3 no presenta suficientes protecciones, pero sus costos y eficiencia son altas por lo que podría considerarse como una buena opción, el regulador 1 al presentar elevado costo y bajas

protecciones se encuentra alejado de la mejor calificación. Consecuentemente se seleccionó el regulador 4 con una calificación de 74 de toda la evaluación.

Tabla 21. Evaluación por matriz pugh de los reguladores preseleccionadas.

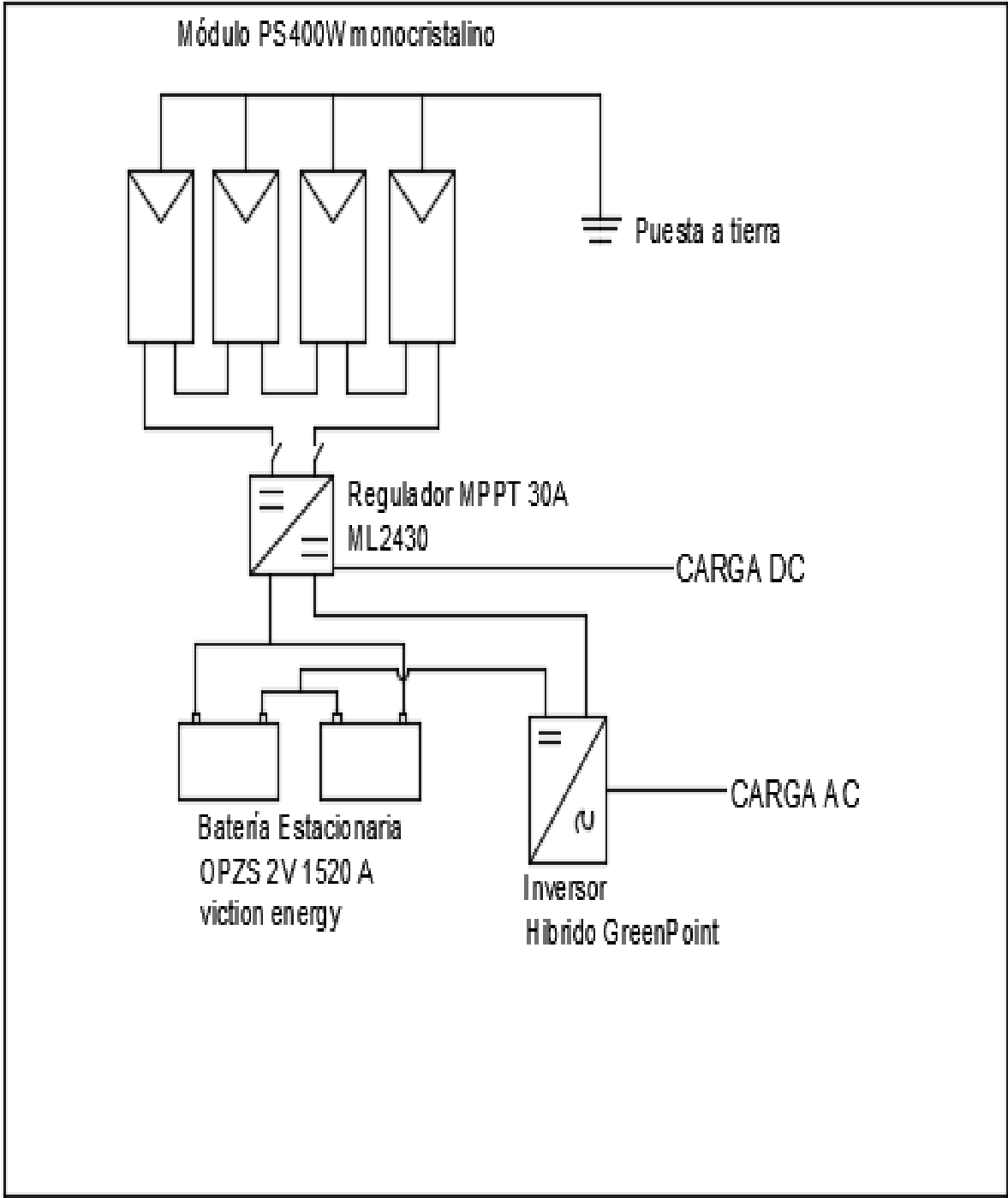
Criterios de Evaluación	Valoración (%)	Regulador 1	Regulador 2	Regulador 3	Regulador 4
Costo (\$COP)	63	0	-1	1	1
Protecciones (#)	26	0	1	-1	0
Eficiencia (%)	11	1	-1	1	1
TOTAL	100	11	-48	48	74

Fuente: Autor.

3.8 DIAGRAMA UNIFILAR.

Finalmente, ya seleccionados los componentes del sistema fotovoltaico se realizó un plano eléctrico y se muestra en la figura 5.

Figura 4. Diagrama Unifilar.



Fuente: Autor.

DISEÑO REUTILIZACIÓN DE AGUA.

4.1 ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA.

Se determinó la demanda de agua mensual para el número de habitantes de la vivienda seleccionada como se ve en la ecuación (20), para esto se definió una dotación neta de $135 \frac{L}{hab*día}$ para una población cálida como lo es Cartagena del

complejidad del sistema medio alto debido a que la población está dentro 12.501 y 60.000 habitantes según el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS [37].

$$D_m = N_h * N_d * dot = 4 \text{ hab} * 30 \text{ dias} * 135 \frac{L}{hab*día} = 16.200 L \quad (20)$$

D_m es demanda mensual (m^3), N_h es el número de habitantes de la vivienda, N_d es el número de días y dot es la dotación neta ($L/hab*día$).

El 31% del gasto diario de agua por persona en Colombia se destina a uso sanitarios, riego de jardines, limpieza de vivienda y demás actividades de acuerdo con Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD)[38]. Por tal motivo se recalcó la demanda mensual (D_{mc}) para estos gastos diarios como se muestra en la ecuación (21):

$$D_{mc} = N_h * N_d * dot * 31\% = 4 \text{ hab} * 30 \text{ dias} * 135 \frac{L}{hab*día} * 0,31 = 5022 L \quad (21)$$

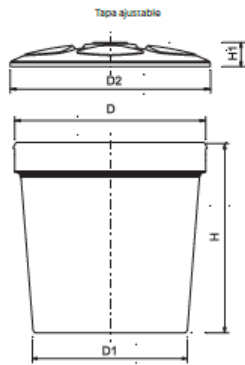
Debido a que en este proyecto se pretende implementar el almacenamiento de agua lluvia como una opción para el ahorro de agua. Se establece la instalación de un tanque de succión de 2000L y sus dimensiones se pueden ver en la Figura 5, el cual puede abastecer un ahorro a la demanda mensual (D_{mc}).

Posteriormente, se seleccionó el tanque de impulsión que va a distribuir agua en la vivienda en función de un diseño estético y práctico para la vivienda y va a tener una capacidad de 1000 L, sus dimensiones se pueden ver en la Figura 5 , el cual

va ser abastecido por medio de una bomba centrífuga desde el tanque de almacenamiento.

Figura 5. Dimensiones de los tanques seleccionados

FICHA TÉCNICA



Volumen bruto Litros	Dimensiones del tanque mm			Dimensiones de la tapa mm	
	D	D1	H	D2	H1
250	810	677	720	850	138.0
250 mini	932	815	443	989	124.4
500	931	758	934	975	170.0
1000	1.232	1.031	1.030	1.275	236.0
2000	1.520	1.220	1.550	1.585	280.0
6000	2.205	1.800	2.197	2.277	250.0
Agrotanque	932	815	443	-	-

Fuente: Eternit [39].

4.2 CANALETAS Y BAJANTES.

Para el dimensionamiento de las canaletas y bajantes, inicialmente se realizó el cálculo del caudal de recolección de las bajantes como se muestra en la ecuación (22), para esta se tuvo en cuenta el valor de intensidad de lluvia de acuerdo con la Curva IDF de Cartagena del Chairá [40].

$$Q_b = Ce * I * A_c * K = 0,9 * 0,000027 * 61 * 0,016 = 1,44 \frac{L}{min} \quad (22)$$

Q_r es el caudal de recolección (L/s), I es la intensidad de lluvia (m/s), Ce es el coeficiente de escorrentía, A_c es el área de captación (m^2) y K es el coeficiente de rugosidad.

De acuerdo con el cálculo anterior y con base a la Norma NTC 1500 se seleccionó el diámetro, un diámetro nominal de la bajante (D_n) de 50 mm como se muestra en la Tabla 22. Y se deben instalar 2 sumideros para las bajantes de acuerdo con el área de captación (NTC 1500).

Tabla 22. Dimensión de bajantes circulares

DN (Diámetro Nominal) (mm)	Caudal (Qr) (L/s)
50	1,3
75	4,2
100	9,1
125	16,5
150	26,8
200	57,6

Fuente: NTC 1500.

Se seleccionó el tipo de sección transversal de los canales y en base a el caudal de recolección se determinó las dimensiones necesarias según la Norma NTC 1500. Se escogió una sección rectangular para las canales y para la selección de sus dimensiones como se puede observar en la Tabla 23, se seleccionó los datos de la segunda fila debido a que el caudal recolector (Qr) de 1,4 *L/min* es menor al valor de 6,8 *L/s*.

Tabla 23. Parámetros para seleccionar dimensiones del canal.

B (mm)	P (m/m)	Q (L/s)	V máx. (m/s)
150	0,004	6,8	0,6
200	0,004	12,4	0,62
250	0,004	22,5	0,72
300	0,004	36,5	0,81

Fuente: NTC 1500.

4.3 FILTRACIÓN.

Teniendo en cuenta que para un sistema de reutilización de agua lluvia el abastecimiento es para uso básico como limpieza de ropa, de pisos, sanitarios y riego, se suele usar un filtro sencillo para su almacenamiento [32]. De acuerdo con lo anterior se utilizará un filtro de la empresa VIC el cual fue diseñado exclusivamente para el reúso de agua no potable, con el fin de separar elementos sólidos del agua lluvia. Este es autosustentable y autoinstalable, funciona bajo procesos físicos naturales llamados aceleración centrípeta, centrífuga y efecto vórtice y cuenta con una salida de los desechos, lo que disminuye casi por completo la necesidad de mantenimiento del filtro.

Este filtro es adaptable a la dimensión de 50 mm de la bajante que se calculó anteriormente y se conecta a la bajante a una altura aproximada de 60cm, y posteriormente al tanque de almacenamiento para que el agua lluvia siga con el proceso de distribución una vez filtrada.

4.4 SISTEMA DE BOMBEO.

Debido a que el agua lluvia es almacenada en un tanque de succión se decidió suministrarla a un tanque de impulsión elevado, para finalmente por el método de gravedad abastecer de agua la vivienda.

De acuerdo con lo establecido en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el tanque de impulsión destinado a recibir el agua lluvia almacenada tiene una capacidad de 1000 litros. Este tanque debe llenarse en un tiempo mínimo de 15 minutos para garantizar que, en caso de interrupción del suministro de agua del acueducto hacia las viviendas, se tenga un respaldo oportuno para satisfacer las necesidades de los habitantes. Por consiguiente, el cálculo del caudal de diseño (Qd) y se observa en la ecuación (23).

$$Qd = \frac{1000 L}{15 min} * \frac{1 min}{60 s} = 1,1 \frac{L}{s} \quad (23)$$

Luego se determinó el diámetro de tubería de succión e impulsión, para esto las velocidades no deben superar 1,80 m/s y 2,50 m/s respectivamente [41], para esto se utilizaron las ecuaciones (24) y (25), los resultados se ven en la Tabla 24.

$$A = \frac{Q}{V} \quad (24)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} \quad (25)$$

Tabla 24. Diámetro de succión e impulsión.

TRAMO DE SUCCIÓN			
Velocidad (m/s)	Área (As) (m ²)	Diámetro (m)	Diámetro Nominal (in)
1,80	0,00061	0,028	1
TRAMO DE IMPULSIÓN			
Velocidad (m/s)	Área (Ai) (m ²)	Diámetro(m)	Diámetro Nominal (in)
2,50	0,00044	0,023	3/4

Fuente: Autor.

A continuación, se va a diseñar el sistema hidráulico, por lo que primeramente se realizó el cálculo el número de Reynolds (Re) y la rugosidad relativa (ε) como se muestra en la ecuación (26) y (27) respectivamente y su resultado se muestra en la Tabla 25 .

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (26)$$

$$\varepsilon = \frac{e}{D} \quad (27)$$

Donde, ν es la viscosidad cinemática del agua, D es el diámetro del tramo de la tubería, V es la velocidad del tramo de la tubería y e es la rugosidad absoluta del material.

Luego, se calculó el factor de fricción (f) del tramo de impulsión que se da en flujo transitorio y el tramo de succión en flujo laminar de acuerdo con la Gráfica 2, en base valores obtenidos del número de Reynolds (Re) y rugosidad relativa (ε) que se muestran en las ecuaciones (26) y (27) y de acuerdo con la ecuación (28), se calculó las pérdidas longitudinales (hf) respectivamente y todos los resultados se ven en la Tabla 25.

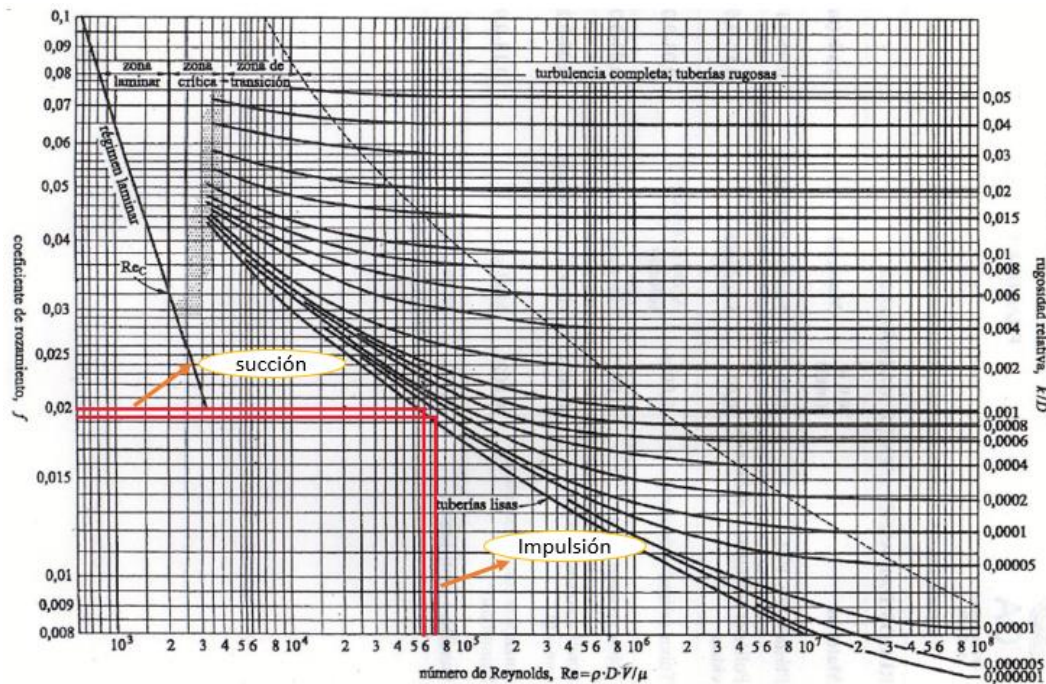
$$hf = f * \frac{V^2}{2g} * \frac{L}{D} \quad (28)$$

Tabla 25. Perdidas longitudinales.

TRAMO DE SUCCIÓN						
Diámetro (in)	Velocidad (m/s)	Longitud (m)	f	Re	ε	Hf (m)
1	1,80	1	0,020	$5,92 \times 10^4$	0,00005	0,10
TRAMO DE IMPULSIÓN						
Diámetro (in)	Velocidad (m/s)	Longitud (m)	f	Re	ε	Hf (m)
3/4	2,50	4,2	0,020	$6,47 \times 10^4$	0,0001	1,02

Fuente: Autor.

Gráfica 2. Diagrama de Moody.



Fuente: Diagrama de Moody en base a el libro Mecánica de Fluidos [42]

El cálculo de las pérdidas por accesorios (h) se realizó mediante la ecuación (29) para esto es necesario conocer los coeficientes (K) del tipo de accesorios que lleva

el tramo de tubería de succión como de impulsión que se tenga en la tubería y se muestra en la Tabla 26.

$$h = K * \frac{V^2}{2g} \quad (29)$$

Tabla 26. Pérdidas de carga de accesorios.

Tramo de succión.				Tramo de impulsión.			
Accesorio	Cantidad	K	Pérdida(h)	Accesorio	Cantidad	K	Pérdida (h)
Salida	1	0,5	0,0825	Entrada	1	0,5	0,1592
Válvula check	1	2,5	0,4128	Válvula Check	1	2,50	0,7963
Codo 90°	1	0,9	0,1486	Válvula de bola	2	20	6,3710
				Codo 90°	1	0,90	0,2866

Fuente: Autor en base a el libro Mecánica de Fluidos [42].

Las pérdidas totales se dan mediante la suma de las pérdidas longitudinales (hf) y las pérdidas de carga por accesorios (h) en cada tramo de la tubería. Al realizar esto se obtiene un valor por succión de 0,74 m e impulsión de 8,64 m.

Después se realizó el balance de energía como se muestra en la ecuación (30),

$$Z1 + \frac{P1}{Y} + \frac{V1^2}{2g} + HB = Z2 + \frac{P2}{Y} + \frac{V2^2}{2g} + Hf1 \quad (30)$$

En donde, $Z1$ es la carga de posición del tanque de succión, $P1$ es la presión en el tanque de succión, Y es el peso específico del agua, $V1$ es la velocidad de succión, g es la gravedad, HB es la carga dinámica total, $Z2$ es la carga de posición del tanque de impulsión, $P2$ es la presión en el tanque de impulsión, $V2$ es la velocidad de impulsión, $Hf1$ son las pérdidas por fricción.

El cálculo de la dinámica total (HB), se realizó en base a la ecuación (29) y bajo las siguientes condiciones iniciales: $P1=Patm=0$; $P2=Patm=0$; $V1=0$; $V2=0$. Por otro

lado, como se indica en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, $Z1$ es igual a cero y $Hf1$ es la suma de las pérdidas longitudinales (hf) y las pérdidas de carga por accesorios (h) en cada tramo de la tubería y el calculó la carga dinámica total (HB) se muestra en la ecuación (31).

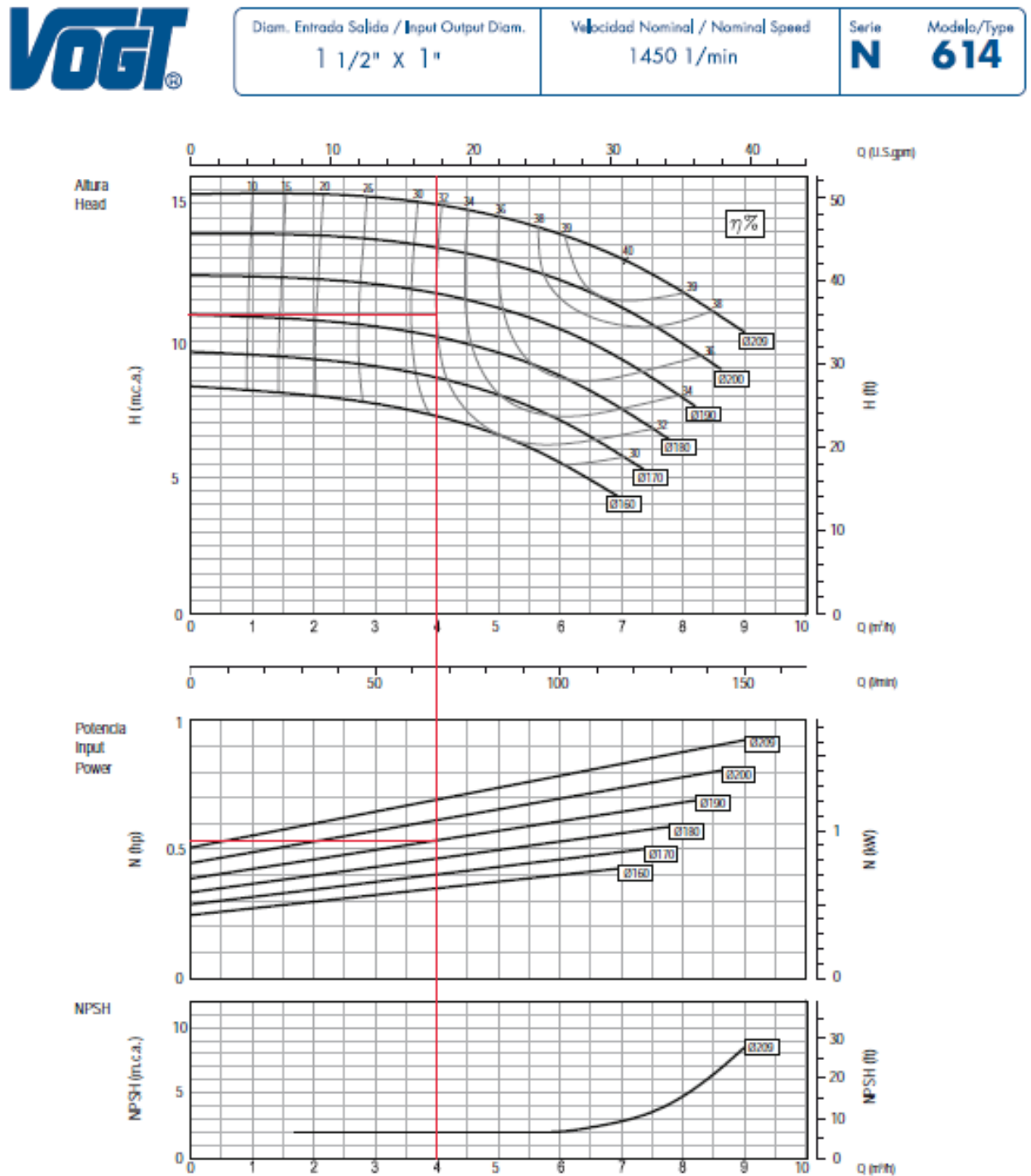
$$HB = Z1 + Hf1 = 3,13m + (0,74m + 8,64m) = 12,51 m \quad (31)$$

Ya con los valores anteriormente calculados se realizó el cálculo de la potencia de la bomba centrífuga que se muestra en la ecuación (32). En donde γ es el peso específico del agua, Q es el caudal de diseño del sistema y e es la eficiencia de la bomba (75%)

$$POTENCIA = \frac{\gamma * Q * HB}{e} = \frac{9810 \frac{N}{m^3} * 0,0011 \frac{m^3}{s} * 12,51 m}{75\%} = 180 W \quad (32)$$

Se procede a realizar la elección de la bomba, esto se realizó mediante los catálogos del fabricante en donde por medio del Caudal (Qd) y la carga dinámica total (HB) se establece la bomba a utilizar. En la *Figura 6* , se observa bomba seleccionada.

Figura 6. Ficha técnica de la bomba seleccionada.



Fuente: Catalogo VOGT.

Como se indica en la *Figura 6* , se seleccionó una bomba centrífuga VOGT N614 que posee un diámetro de succión de 1 ½”, un diámetro de impulsión de 1”, un tamaño del impulsor de ø200, una velocidad de 1450 L/min, un NPSH (carga de succión positiva neta) menor a 2 m.c.a y una eficiencia del 32%, teniendo en cuenta que la máxima eficiencia de esta es del 40 %. Es importante destacar que la eficiencia de la bomba puede variar dependiendo de factores como la velocidad de operación, el caudal, la presión, etc. Además, las condiciones reales de operación pueden diferir de las condiciones ideales, lo que puede hacer que la eficiencia varíe en la práctica.

4.4.1 Cálculo del NPSH requerido

Se calculó el NPSH del sistema en la ecuación (33), esta configuración está dada para cuando el nivel de agua del tanque de succión que está por encima de la bomba [42]. La altura estática de fluido (Hs) es la presión a la que está sometida el tanque y en este caso sería a 350 m sobre el nivel del mar para la región y equivale a 9,91 m.c.a, la altura de succión o aspiración (Ha) es la altura del tanque de succión que es de 1,5 m y se puede ver en la Figura 5.

La presión de vapor (Hvp) o altura de agua debido a la presión del fluido, se obtiene de acuerdo con la temperatura promedio de la región y es de 0,3366 m.c.a. Las pérdidas totales en el tramo de succión (Hf) son de 0,73 m.

$$\begin{aligned} \text{NPSH} - \text{sistema} &= H_s + H_a - H_{vp} - H_f = \\ 9,91 \text{ m.c.a} + 1,5 \text{ m} - 0,3366 \text{ m.c.a} - 0,73 \text{ m} &= \\ 10,34 \text{ m} & \end{aligned} \quad (33)$$

El NPSH de la bomba es menor de 2 m como se observa en la Figura 6. Por otro lado es necesario que la bomba funcione de la mejor manera y no presente cavitación, por tal motivo, el NPSH del sistema tiene que ser mayor que el NPSH requerido y se da un margen de seguridad de 0,50 m como se muestra en ecuación (34).

$$NPSH \text{ del sistema} > NPSH \text{ de la bomba} + 0,5 \text{ m}$$

$$10,34 \text{ m} > 2 \text{ m} + 0,5 \text{ m}$$

$$10,34 \text{ m} > 2,5 \text{ m} \quad (34)$$

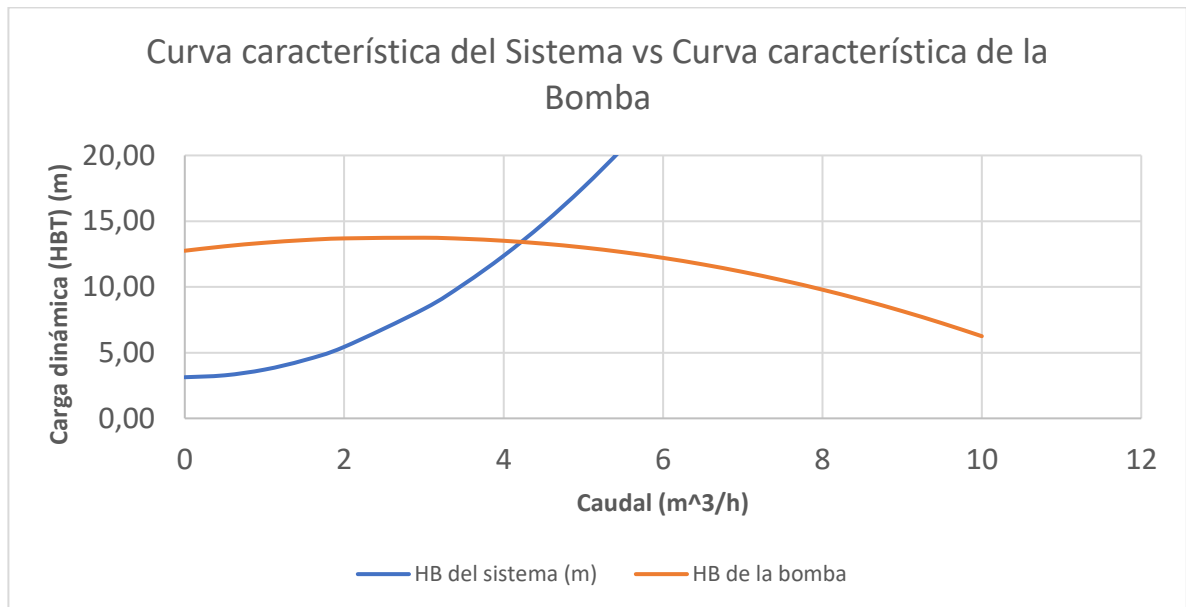
Con esto se verificó que la bomba seleccionada va a funcionar correctamente.

4.4.2 Cálculo de las curvas características.

Finalmente, mediante la carga dinámica total del sistema que se puede ver en la ecuación (31) y la carga dinámica de la bomba seleccionada obtenida del libro Mecánica de Fluidos [42], se realizó iteración en donde la carga dinámica total (HBT) (m) se expresó en función de caudal (m^3/h), como se indica en la Gráfica 3.

Este gráfico especifica el punto de operación, el cual arrojó un caudal de 4,5 (m^3/h) y una HBT de 13 m. Con estos valores, se obtuvieron los siguientes datos en base a la Figura 6: una potencia de 0,64 HP, un NPSH menor de 2 m.c.a y una eficiencia del 34%.

Gráfica 3. Curva característica del Sistema vs Curva característica de la Bomba.

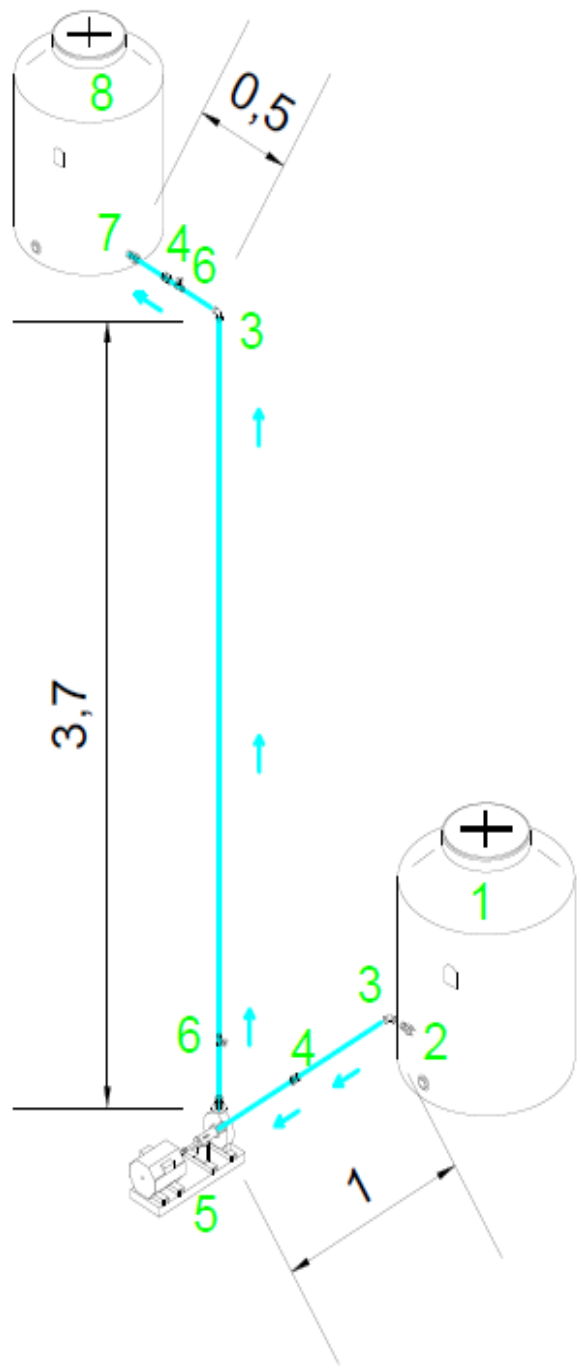


Fuente: Autor.

4.5 ESQUEMA HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE BOMBEO.

Ya seleccionados los componentes del sistema que va a bombear agua a la vivienda se realizó un plano hidráulico y se muestra en la figura 7.

Figura 7. Plano hidráulico del sistema de bombeo



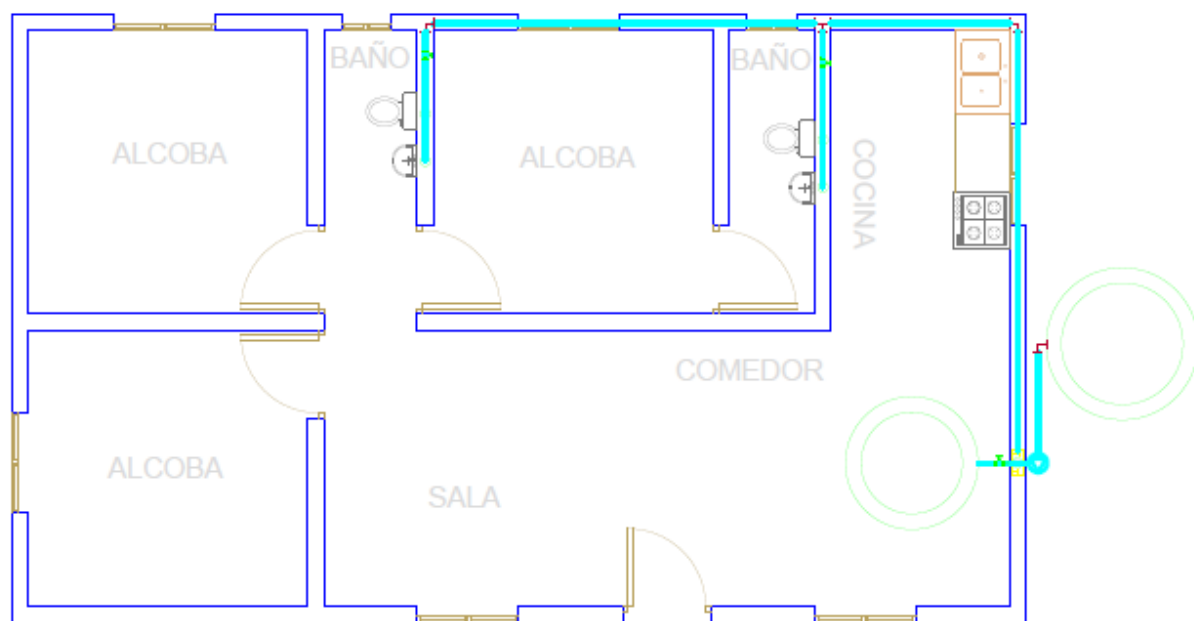
ACCESORIOS	
1	TANQUE DE SUCCIÓN
2	ACOPLE DE SALIDA
3	CODO 90°
4	VÁLVULA CHECK
5	BOMBA CENTRÍFUGA
6	VÁLVULA DE BOLA
7	ACOPLE DE ENTRADA
8	TANQUE DE IMPULSIÓN

Fuente: Autor.

4.6 PLANO HIDRÁULICO DE LA VIVIENDA.

En la Figura 8, podemos observar el plano de sistema hidráulico de la vivienda.

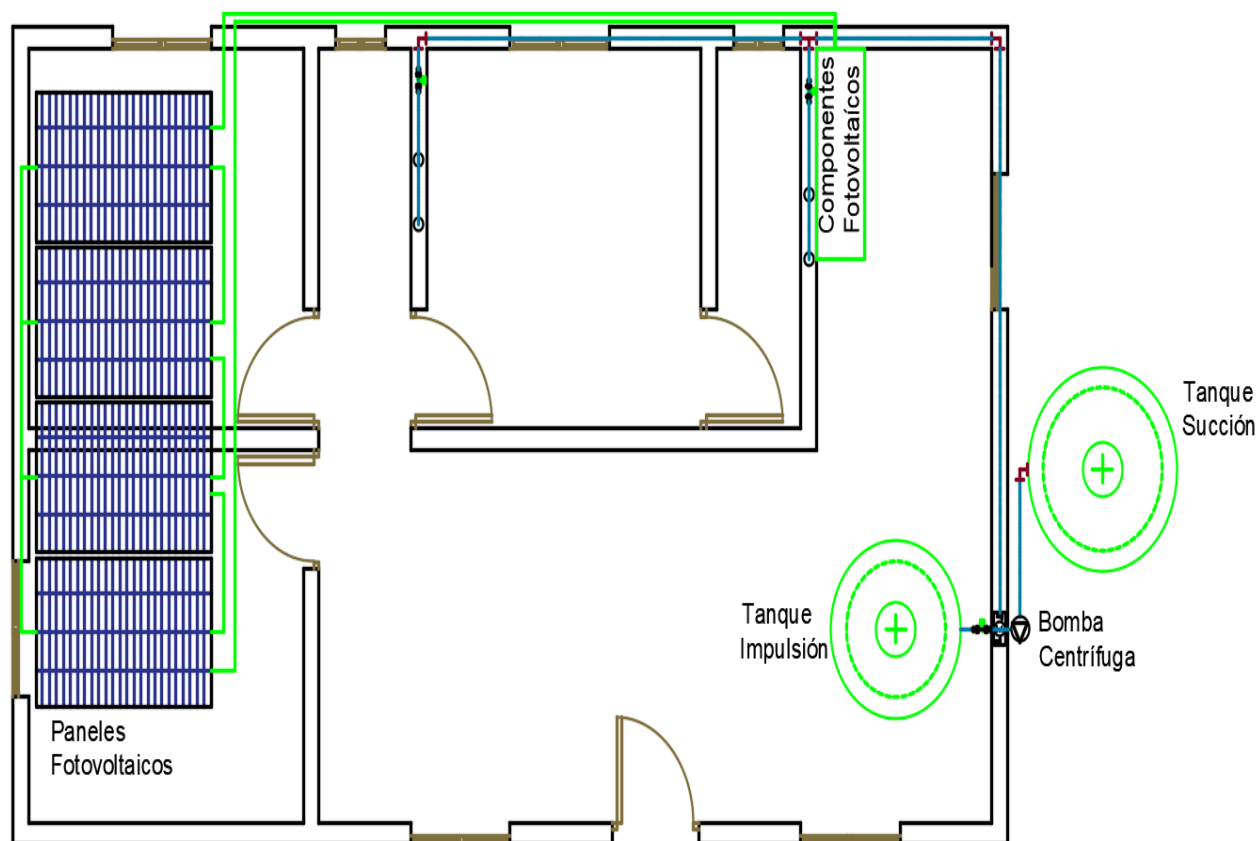
Figura 8. Plano hidráulico de la vivienda.



Fuente: Autor.

PLANO FINAL DE LOS SISTEMAS A IMPLEMENTAR EN LA VIVIENDA.

Figura 9. Plano final de los sistemas a implementar.



Fuente: Autor.

EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO.

Para conocer la rentabilidad de este proyecto, fue necesario establecer la totalidad de los costos. Por tal motivo, se realizaron las cotizaciones de todos los elementos que se incluyeron en el cumplimiento de todos los objetivos.

5.1 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA FOTOVOLTAICA.

En la Tabla 27 se indica los costos pertenecientes a los equipos del sistema fotovoltaico.

Tabla 27. Presupuestos de equipos eléctricos.

Componente	Cantidad	Proveedor	Coste unitario (\$COP)	Costos totales (\$COP)
Módulo PS 400 W monocristalino	4	Emergente	\$734.000,00	\$2.936.000,00
Inversor híbrido green point	1	Auto solar	\$2.135.803,00	\$2.135.803,00
Batería estacionaria TAB 8 OPzS 800 1204 Ah-Bat Plus	2	Baterías industriales	\$2.208.802,00	\$4.417.604,00
Regulador MPPT 30A ML2430	1	Auto solar	\$490.797,00	\$490.797,00
			TOTAL	\$9.980.204,00

Fuente: Autor.

Como se indica en la Tabla 27, la adquisición de los equipos de eléctricos tiene un costo de 9.980.204 \$COP.

5.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE REUTILIZACIÓN DE AGUA.

En la Tabla 28 se indica los costos pertenecientes a los elementos del sistema hidráulico.

Tabla 28. Presupuestos de los equipos hidráulicos.

Componente	Cantidad	Proveedor	Coste unitario (\$COP)	Costos totales (\$COP)
Codo de 90°	2	Homcenter	\$400,00	\$800,00
Válvula de bola	2	Homcenter	\$17.900,00	\$35.800,00
Válvula Cheque	2	Homcenter	\$33.900,00	\$67.800,00
Bomba centrífuga	1	VOGT	\$410.000,00	\$410.000,00
Filtro VIC	1	VIC	\$1.750.000,00	\$1.750.000,00
Bajante 2" pvc x 3m	1	PVC del caribe	\$37.762,00	\$37.762,00
Canal pvc x 1m	25	Homcenter	\$22.266,67	\$556.666,75
tubería 1" pvc x 1m	1	Homcenter	\$10.000,00	\$10.000,00
tubería 3/4"pvc x 1m	5	Homcenter	\$4.200,00	\$21.000,00
			Total	\$2.889.828,75

Fuente: Autor.

Como se indica en la Tabla 28, la adquisición de los elementos y equipos tiene un costo de 2.889.828 \$COP.

5.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA VIVIENDA SELECCIONADA.

EL costo de la vivienda seleccionada es de 27.000.000 \$COP de la empresa la Casas prefabricadas s.a.s. con un área de 60 m².

5.4 EVALUACIÓN DE COSTOS FINALES.

Tabla 29. Costos finales del proyecto.

Sistema	Cantidad	Coste unitario (\$COP)	Costos totales (\$COP)
Vivienda Modular	1	\$27.000.000,00	\$27.000.000
Sistema fotovoltaico	1	\$9.980.204,00	\$9.980.204
Sistema reutilización agua	1	\$2.889.828,75	\$2.889.828
		TOTAL	\$39.870.032

Fuente: Autor.

De acuerdo con Tabla 29, se pueden observar los costos totales de cada uno de los sistemas seleccionados, para un total de 39.870.032 \$COP. Hay que tener en

cuenta que estos valores pueden cambiar de acuerdo con las necesidades que se requieran y de la disposición de cada elemento debido al índice de precios al consumidor (IPC) dado por el DANE [43].

5.5 EVALUACIÓN DE DISEÑO.

El costo del diseño del proyecto se estableció a partir del manual de referencia para la contratación de servicios profesionales en Colombia de acuerdo a la Asociación Colombiana de Ingenieros. De acuerdo con lo anterior se dice que los honorarios para un ingeniero mecánico sin experiencia específica de ejercicio profesional debe ser 4 salarios mínimos vigentes (SMMLV) [44], para un costo total de 5.200.000 \$COP.

CONCLUSIONES

Se seleccionó una vivienda modular de la empresa Casas prefabricadas s.a.s que cuenta con un tiempo de desarrollo de 12 semanas, un costo de 43.857.00 \$COP para un área de 60 m^2 y logra la habitabilidad de 4 personas.

Se realizó el diseño de un sistema solar fotovoltaico que provee el 100% de la demanda energética para una vivienda de Cartagena del Chairá de acuerdo a los 4 módulos tipo monocristalino seleccionados y cada uno con una potencia de 400 W. Por otro lado, de acuerdo con las entradas MPPT de los inversores como de los reguladores que seleccionaron se puede dar la posibilidad de adaptar un aumento de potencia en la instalación solo si se respeten los límites de corriente y tensión según corresponda.

De acuerdo a que se realizó el diseño para un sistema autónomo, fue seleccionada una batería estacionaria la cual presenta una capacidad de 1204 A, una carga con durabilidad de 20 semanas y un costo de 2.208.000 \$COP.

La demanda requerida para el sistema de reutilización agua lluvia es del 31% de la demanda mensual de 16.200 L para 4 habitantes de la vivienda seleccionada. Esto implica el uso de un tanque de almacenamiento de 2.000 L, 2 sumideros para las bajantes, un filtro básico y una bomba centrífuga para el sistema hidráulico.

REFERENCIAS

- [1] Humberto Rodríguez Murcia, “Formulación de una Propuesta para una Acción de Mitigación Nacionalmente Apropiada (NAMA) para las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia Informe Final Consolidado Mayo de 2016,” *Organ. Latinoam. Energía*, p. 247, 2016.
- [2] Alcaldía de Tumaco, “PLAN DE DESARROLLO DISTRITAL DE TUMACO ‘Enamórate de Tumaco 2020 – 2023’.” María Emilsen Angulo Guevara – Alcaldesa,” *Alcaldía de Tumaco*, p. 442, 2020, [Online]. Available: <http://www.tumaco-narino.gov.co/planes/plan-de-desarrollo-enamorate-de-tumaco-2020--2023>.
- [3] A. L. Juan Felipe Bustos González and S. y K. T. Aponte, “Zonas no interconectadas eléctricamente en colombia: problemas y perspectiva,” *Econografos Esc. Econ.*, p. 27, 2014, [Online]. Available: <http://www.fcenew.unal.edu.co/publicaciones/images/documentos-econografos-economia-65.pdf>.
- [4] K. Ortega and A. Jurado, “Cartagena del chaira una magia amazónica con violencia, pobreza y abandono,” *Semillero Investig. Imanigua*, no. September, 2019, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/335834129_CARTAGENA_DEL_CHAIRA_UNA_MAGIA_AMAZONICA_CON_VIOLENCIA_POBREZA_Y_ABANDONO.
- [5] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, *BOLETÍN TARIFARIO ZNI (Enero-Marzo 2023)*. 2023.
- [6] Ministerio de minas y energía, “Memorias al congreso de la República 2018-2019,” *Minist. Minas y Energías*, pp. 1–238, 2019.
- [7] Z. J. SANDOVAL NÚÑEZ *et al.*, “Plan Departamental para el Manejo Empresarial de los servicios de Agua y Saneamiento PDA Departamento de

Caquetá,” vol. 57, no. 8, 2023.

- [8] C. Chairá, E. L. Cambio, E. S. Ahora, and C. Del, “ EL CAMBIO ES AHORA - EL CAMBIO LO HACEMOS TODOS ’ Edilberto Molina Hernández Alcalde popular,” no. 3, pp. 1–147, 2020.
- [9] Comisión de Regulación de Energía y Gas., “Zonas no Interconectadas | CREG,” 2003.
http://www.creg.gov.co/html/Ncompila/htdocs/Documentos/Energia/docs/ley_0855_2003.htm.
- [10] S. E. De, L. P. Molina, J. Luis, E. Ticora, O. Andres, and C. Rodriguez, “PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO LA ARQUITECTURA Y CONSTRUCCIÓN MODULAR EVALUADA DESDE EL TRIANGULO DE LA TRIPLE RESTRICCIÓN Y APLICADA AL SECTOR EDUCATIVO EN COLOMBIA,” Bogotá D.C., Jun. 2018. Accessed: Sep. 30, 2020. [Online]. Available:
[https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22437/1/Documento Proyecto - La arquitectura y construcción modular evaluada desde el triangulo de la triple restricción y aplicada al sector educativo en Colombia..pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22437/1/Documento%20Proyecto%20-%20La%20arquitectura%20y%20construcción%20modular%20evaluada%20desde%20el%20triángulo%20de%20la%20triple%20restricción%20y%20aplicada%20al%20sector%20educativo%20en%20Colombia..pdf).
- [11] EPEC, “Las energías renovables Contenidos.,” p. 12.
- [12] G. De Nuevas and A. Profesionales, *ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA*. .
- [13] J. Solano, C.; Gonzaga, F.; Espinoza, F.; Espinoza, “Sistema de captación de agua de lluvia para uso doméstico , Isla Jambelí , cantón Santa Rosa Rainwater collection system for domestic use , Jambelí Island , cantón Santa Rosa,” *Sist. captación agua lluvia para uso doméstico , Isla Jambelí , cantón St. Rosa Rainwater Collect. Syst. Domest. use , Jambelí Isl. , cantón St. Rosa*, vol. 3, no. 1, pp. 151–159, 2017, [Online]. Available:
<http://investigacion.utmachala.edu.ec/revistas/index.php/Cumbres/article/view/201>.

- [14] H. Du, P. Huang, and P. Jones, "Modular facade retrofit with renewable energy technologies: The definition and current status in Europe," *Energy Build.*, vol. 205, no. 2019, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109543.
- [15] A. Roperio, D., & Comas, "CONSTRUCCION MODULAR DE VIVIENDAS Y ARQUITECTURA," *dream*, p. 77, 2013, Accessed: Sep. 26, 2020. [Online]. Available: http://eraikal.blog.euskadi.eus/wp-content/uploads/2013/01/Construcci_n-Modular-y-Arquitectura-2.pdf.
- [16] Z. Yang and W. Lu, "Facility layout design for modular construction manufacturing: A comparison based on simulation and optimization," *Autom. Constr.*, vol. 147, no. June 2022, p. 104713, 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104713.
- [17] M. A. Abella, "Master en Energías Renovables y Mercado Energético Energía Solar Fotovoltaica. Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos," pp. 1–59, 2010.
- [18] Solar Energy International, "Manual de diseño e instalación," *Sol. Energy Int.*, pp. 1–65, 2016, [Online]. Available: <https://www.solarenergy.org/wp-content/uploads/2019/11/Fotovoltaica-Condensed.pdf>.
- [19] T. Días and G. Carmona, "Componentes de una instalación solar fotovoltaica 1," vol. 1, pp. 18–24, 2016.
- [20] R. Torres Hugues, "La captación del agua de lluvia como solución en el pasado y el presente.: Discovery Service para Universidad Piloto de Colombia," vol. XL, no. 2, pp. 1–16, 2019, [Online]. Available: <https://eds-p-ebscohost-com.unipiloto.basesdedatosezproxy.com/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=6&sid=1b9dbeea-1839-42ac-b5fd-239b53987d9a%40redis>.
- [21] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - Oficina Regional De La FAO Para America Latina Y El Caribe, *Captación Y*

Almacenamiento De Agua De Lluvia. 2013.

- [22] P. R. Yoder, D. M. Stubbs, K. A. Sawyer, and D. Aikens, *Opto-mechanical design process*, vol. 1. 2017.
- [23] J. Osorio and J. Orejuela, "EL Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación," *Sci. Tech.*, vol. XIV, no. 39, pp. 247–252, 2008, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=84920503044>.
- [24] NASA, "POWER | Data Access Viewer." <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (accessed Aug. 25, 2021).
- [25] DANE, "Sistema Estadístico Nacional - SEN," *Dane*, vol. La informa, 2020.
- [26] "IPSE, «Encuesta de caracterización: Socioeconómica, cultural y ambiental en la Colombia No Interconectada.» 2019.
- [27] DANE, "CG población : CG y CNPV 2018 Estructura de población : Cauca , CG 2005 y CNPV 2018," pp. 8–10, 2018, [Online]. Available: <https://sitios.dane.gov.co/cnpv/#!/>.
- [28] C. y T. Ministerio de Vivienda, "ESPECIFICACIONES TÉCNICAS VIVIENDA Y OBRAS DE URBANISMO."
- [29] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio- MVCT *et al.*, "DOCUMENTO TÉCNICO DE PARAMETRIZACIÓN Subsidio Familiar de Vivienda Rural-SFVR Vivienda Nueva de Interés Social Rural y Mejoramientos de Vivienda REPÚBLICA DE COLOMBIA MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO-MVCT Dirección de Vivienda Rural Política Pú," 2021, [Online]. Available: www.minvivienda.gov.co.
- [30] Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas., "Informe telemetría mensual de julio," no. IPSE, p. 93, 2023.

- [31] UPME, “PROYECCIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y POTENCIA MÁXIMA 2023-2037,” 2023.
- [32] C. D. Pretel Higueta, “Diseño De Sistema Solar Fotovoltaico Aislado E Individual En El Corregimiento Bocas Del Atrato - Turbo,” p. 31, 2021.
- [33] J. Salvador Mañés, “UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial,” p. 90, 2022.
- [34] B. Alba and D. Pinzón, “Implementación de una práctica de laboratorio para la evaluación de la eficiencia de paneles fotovoltaicos de diferente tecnología en el laboratorio de energías alternativas de la Escuela de Ingeniería Mecánica,” 2023.
- [35] F. Mezei, *Basics Concepts*. 2011.
- [36] F. de J. Acevedo Garcés, “DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA CON CAPACIDAD PARA 3 KILOVATIOS,” 2016.
- [37] Ministerio de vivienda ciudad y territorio, *RAS 2000 Título “B” Sistemas de Acueducto*. 2010.
- [38] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, “Servicios Públicos Domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado Vigencia 2021,” 2022. [Online]. Available: <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-sectorial-SSPD-2021.pdf>.
- [39] IDE Technologies, “Soluciones de agua | IDE Tech,” 2018. <https://bit.ly/3DaiwP5>.
- [40] D. Ávila, P. Bautista, and Z. Medina, “Análisis del nivel de precipitaciones, mediante la elaboración de curvas IDF y mapas de isohietas para el estudio de climatología en el departamento de Caquetá, Putumayo y Amazonas,” 2020.
- [41] L. M. Ávila Beltrán and L. G. Ramirez Bohorquez, “Diseño Hidráulico De Un

Sistema Y Recolección De Aguas Lluvias Para Uso Sanitario En El Colegio Lausana Ubicado En La Ciudad De Bogotá D.C.,” p. 94, 2015, [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria Citación.

- [42] R. Mott and J. Untener, “Mecánica de fluidos Séptima Edición,” *Pearson Educ.*, p. 556, 2015.
- [43] DANE, “Boletín técnico Índice de Precios al Consumidor (IPC) Boletín técnico,” 2024. .
- [44] Asociación Colombiana de Ingenieros (ACIEM), “Manual de Referencia de Tarifas de Ingeniería,” pp. 37–39, 2015.