

Aplicación de la metodología QFD al diseño de un colector tubular híbrido de humedad residual del medio ambiente y lluvia

Application of the QFD methodology to the design of a hybrid tubular collector of residual moisture from the environment and rainfall

Ricardo García-León^{1a}, Armando Rafael Cervantes-Padilla^{1b}, Gustavo Guerrero-Gómez²

¹ Grupo de investigación INGAP, Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia.
Orcid: 0000-0002-2734-1425^a, 0009-0007-1457-7467^b. Correo electrónico: ragarcial@ufpso.edu.co^a,
arcervantesp@ufpso.edu.co^b

² Grupo de investigación GITYD, Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia.
Orcid: 0000-0002-4316-7113. Correo electrónico: gguerrerog@ufpso.edu.co

Recibido: 13 julio, 2023. Aceptado: 15 noviembre, 2024. Versión final: 9 marzo, 2024.

Resumen

En este estudio, se desarrolló el diseño de un colector híbrido de humedad ambiental y agua de lluvia para la captación de agua, utilizando teorías y métodos de diseño. El diseño mecánico se llevó a cabo utilizando la metodología QFD (Despliegue de la Función de Calidad), que proporcionó herramientas para el modelado de un sistema de recolección de agua de lluvia y humedad que fuera económico, independiente energéticamente y fácil de implementar y manejar. La estructura del colector de agua de lluvia de material acrílico demostró una adecuada dureza y resistencia (con una energía necesaria 4.7 lb/ft), siendo capaz de soportar la carga de lluvia y el peso de los paneles solares, con una resistencia superior a la de un techo convencional elaborado de tejas. Además, se logró un diseño visualmente atractivo, óptimo para su instalación en parques y entradas de centros comerciales, debido a que proporciona agua potable, energía y sombra. Finalmente, se evidenció que un diseño sin la implementación del sistema de refrigeración podría ofrecer una solución óptima para el suministro de agua en áreas donde no existe acceso a agua potable y la cantidad de lluvia anual excede los 150 días.

Palabras clave: QFD; diseño mecánico; agua; colector; sostenibilidad; maquina; humedad; paneles.

Abstract

In this study, the design of a hybrid collector for ambient humidity and rainwater harvesting was developed for water collection, utilizing design theories and methods. The mechanical design was carried out using the Quality Function Deployment (QFD) methodology, which provided tools for modeling a rainwater and humidity collection system that was cost-effective, energy-independent, and easy to implement and manage. The structure of the acrylic rainwater collector demonstrated adequate hardness and strength (with a required energy of 4.7 lb/ft), capable of withstanding rain load and the weight of solar panels, with superior resistance to that of a conventional roof made of tiles.

Furthermore, a visually appealing design was achieved, optimal for installation in parks and mall entrances, as it provides potable water, energy, and shade. Finally, it was evidenced that a design without the implementation of the cooling system could offer an optimal solution for water supply in areas where there is no access to potable water and the annual rainfall exceeds 150 days.

Keywords: QFD; mechanical design; water; collector; sustainability; machine; humidity; panels.

1. Introducción

El abastecimiento de agua potable ha sido una constante de preocupación en algunos países y regiones del mundo, dando lugar al estudio y preservación de las cuencas hídricas, la contaminación con la extracción de minerales y la deforestación ha aumentado el índice de escases del fluido en toda Latinoamérica [1]. A lo largo de la historia, el ser humano ha buscado diferentes métodos de abastecerse de agua y quizá uno de los primeros sistemas de abastecimiento de agua data del año 4000 a.C., donde las personas captaban el agua lluvia como alternativa para el riego del cultivo y consumo doméstico a través de tejados y ductos que llevaban una cisterna subterránea.

Con el aumento poblacional a nivel mundial y la tecnificación en la agricultura, los sistemas de disponibilidad de agua fueron aumentando debido a que demográficamente aumenta el consumo de agua potable, el aprovechamiento del agua lluvia ha sido significativo especialmente en zonas áridas o semidesérticas, por ello, de acuerdo a los aportes de Ballén, Galarza, y Ortiz en Israel y Jordania han desarrollado sistemas de captación de agua de lluvia que datan de 4000 años atrás, estos sistemas consistían en el desmonte de lomeríos para aumentar la escorrentía superficial [2].

Calzadilla et al. [3], definieron los parámetros de diseño y criterios acorde a las condiciones climáticas de la región, para el diseño de un sistema de captación de agua de lluvia en el campo Tierra Brava de la Cooperativa de Créditos y Servicios de la CCS, en la llanura Sur de Pinar del Río. La escasez de agua hacía que los cultivos frutales y la crianza de animales doméstico fuera difícil. Una intervención encontró que los valores medios de precipitaciones estudiadas durante 58 años fueron de 1,367 mm con picos superiores a la media con períodos de retorno de 5 años, en otras palabras: En promedio en uno de cada cinco años, la lluvia superará los 1,543 mm, y en aproximadamente 4 años superará los 1,000 mm; lo que asegura agua disponible para ser captada y almacenada. De tal manera, se estableció un buen ajuste de los registros de precipitación a la función de distribución de Gumbel con un 95% de confianza. Considerando los registros de precipitaciones y la caracterización hidrológica, los

autores determinaron que para diseñar el sistema hidráulico que permita la captación de lluvia en los tejados en la finca, se requería la utilización de canales inclinados que abarcaría 100 y 50 mm, respectivamente; considerando un área de captación de 263 km² que pudiese captar caudales de conducción entre 0.8745 a 1,750 l/s para un volumen total de 237.5 m³ del líquido. López Hernández et al. [4] diseñaron sistemas de captación del agua de lluvia como alternativa de abastecimiento hídrico, donde propusieron diseñar tres sistemas para destinar el agua a uso doméstico de un hogar de cuatro personas, a consumo humano en una institución educativa de 1,000 personas y al riego de cultivos de media hectárea para el municipio de Calpulalpan.

En el desierto de Atacama Chile, uno de los lugares más secos del mundo, se implementaron dispositivos conocidos como atrapa nieblas, que consiste en una red extendida con pequeñas aberturas de 1.0 mm de ancho para capturar las pequeñas gotas de agua provenientes de la neblina. Las gotas se acumulan en la red formando gotas más grandes y posteriormente caen de la red al sistema de recolección ubicado en la parte inferior. La cosecha nieblas en Chile, recolectan aproximadamente 30,000 l/año [5], [6].

En Colombia, estudiantes universitarios ven el uso de agua lluvia como fuente aprovechable para el desarrollo sostenible de las poblaciones, de allí que los referentes a consultar son amplios en diferentes centros de formación profesional, por tal motivo, se presentan algunas tesis o trabajos de grado que apuntan al desarrollo de sistemas de captación de agua lluvia y humedad. Muñoz & Suarez, desarrollaron un sistema que implementa la obtención de aguas lluvias en cultivos hidropónicos para la Universidad La Gran Colombia. Metodológicamente utilizaron el enfoque cuantitativo utilizando la pluviometría como técnica de datos, un levantamiento arquitectónico de información de la zona y un análisis de costos, dando como resultado un prototipo de sistema Rain Wall o pared de lluvia, sistema híbrido que integra dos técnicas, la recolección de aguas lluvias y el cultivo hidropónico. El sistema de recolección de aguas lluvias tiene tres elementos esenciales (tanque, filtros y bomba); y el otro, que está entre el paso del agua del tanque general al hidropónico, que tiene un nivel de purificación más alto ya que las

plantas no pueden recibir bacterias y residuos orgánicos que recoge el agua de la cubierta [7].

Mosquera & Ramírez [8] desarrollaron una investigación sobre la obtención de agua mediante la condensación de la humedad del aire en la ciudad de Santa Marta. El objetivo principal del trabajo de investigación fue crear un mecanismo a pequeña escala capaz de captar agua de la humedad del aire como alternativa para mitigar la escasez de agua en la ciudad. El proceso de condensación de agua lo llevaron a cabo con un ciclo simple de refrigeración (R-134, como fluido refrigerante), un ventilador (para garantizar las corrientes de aire), tras dos meses del desarrollo la captación promedio a una temperatura ambiente entre 27 y 30 °C fue de 1,186 litros de agua.

Ruiz Garzón et al. [9] diseñaron un sistema para el aprovechamiento de agua lluvia y ahorro de agua potable en el colegio la Nueva Esperanza del municipio de La Calera, trabajo que tuvo especial interés en diseñar un sistema de aprovechamiento de agua lluvia para contribuir al ahorro y uso eficiente del agua del colegio. El diseño se logró utilizando curvas IDF considerando datos estadísticos de una estación pluviométrica de la región, y de esta manera se inició con el cálculo y análisis del diseño de cada uno de los componentes mecánicos del sistema.

Velandia-Bernal & Ortiz-Forero [10] desarrollaron una propuesta para la captación y uso de agua lluvia en las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia a partir de un modelo físico de recolección de agua, partiendo de la construcción de un modelo físico el agua lluvia captada en el edificio R para la recolección y distribución de agua lluvia, apoyados metodológicamente en un montaje experimental físico del modelo, utilizando materiales no contaminantes. El procedimiento se realizó a través del estudio de las trincheras o modelos de retención, que permiten establecer cuáles son las propiedades filtrantes y la condición de retención de partículas contaminantes que transporta el agua lluvia.

Quintero-Ortiz [11] diseñó un sistema de riego con reservorio como alternativa de aprovechamiento de agua en la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, con la finalidad de obtener una alternativa al desabastecimiento de agua para riego, a través del aprovechamiento de las aguas lluvias con almacenamientos debidamente diseñados y como una forma de aprovechar el agua lluvia

Peñaloza-Velásquez [12] crearon un sistema de recolección de agua mediante el método atrapa nieblas

en la finca la Laguna del corregimiento de Pueblo Nuevo y en el jardín Botánico de la UFPSO en Ocaña, como alternativa para uso doméstico, agrícola e industrial. La investigación se destaca porque este sistema captó 65,020 litros en un poco más de tres meses. A diferencia de los autores que utilizaron un dispositivo conocido como atrapa nieblas (que consiste en un telón en el cual las gotas de rocío quedan atrapadas gracias al pequeño tamaño de sus intersticios, se acumulan y bajan por gravedad a un ducto de recolección).

Considerando lo anterior, en la presente investigación se llevó a cabo la propuesta de diseño de un colector tubular híbrido de humedad residual del medio ambiente y lluvia para regiones de difícil acceso al agua potable, aplicando teorías de diseño mecánico y QFD para seleccionar el diseño conceptual óptimo basado en las necesidades y requerimientos del cliente, y de esta manera, generar un diseño de acuerdo con las condiciones medioambientales de la región nortesantandereana.

2. Materiales y métodos

Este proyecto se centra en el municipio de La Playa de Belén en Norte de Santander, con el objetivo principal de identificar las variables necesarias para el diseño conceptual de una máquina destinada a la recolección de humedad residual. Una vez completado el estudio, se espera su potencial uso como una herramienta alternativa para obtener agua de las precipitaciones y la humedad atmosférica. Por lo tanto, el estudio adopta un enfoque tanto cualitativo como cuantitativo, utilizando un método deductivo que se basa en la recopilación de información estadística y numérica, el análisis de datos climáticos y consideraciones técnicas y medibles para el sistema de captación [3]. Debido a que se espera llegar al diseño y construcción del sistema considerando una investigación proyectiva.

2.1. Consideraciones técnicas iniciales

El municipio de La Playa Belén se encuentra en el departamento de Norte de Santander, caracterizado por una notable variabilidad en la distribución de la precipitación. Según datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, las regiones de Ocaña, Abrego y La Playa presentan niveles de precipitación relativamente bajos, oscilando entre 1,000 y 1,600 milímetros de lluvia anuales (mm/año) [13]. La temperatura promedio en el municipio de la Playa oscila entre 20 y 22 ± 3°C, de esta forma, se considera una velocidad anual mínima del viento para el 2019 de 0.34 m/s. La velocidad del viento presente en el municipio de

la playa Belén Norte de Santander a una altura de 8.0 m presenta un potencial eólico bajo con velocidades promedio inferiores a 4.0 m/s por lo que no es recomendable un sistema con turbina eólica de eje vertical siendo la velocidad mínima requerida de 6 m/s para una turbina de baja potencia [4]. Por tal motivo, el sistema presentaría fallas en el suministro de energía, desabastecimientos y precios elevados al requerirse más de una turbina o conjunto de turbinas eólicas para suplir la demanda.

2.2. Metodología del diseño mecánico

Para el desarrollo de un diseño mecánico óptimo, es crucial reconocer las cuatro fases fundamentales que conforman el ciclo de vida de un producto. Este ciclo comienza con el desarrollo del producto, seguido de la fabricación, producción e instalación, para luego abordar los aspectos característicos relacionados con el uso del producto. Finalmente, culmina con su vida útil, como se detalla en la [Tabla 1](#).

Considerando la metodología de diseño mecánico, se logra entender e interpretar la solicitud del cliente, desarrollar conceptos y refinarlo en especificaciones de fabricación (es decir, dibujos, listas de materiales y montaje instrucciones) [15]. Por otra parte, el proceso de diseño tiene un esquema definido para el proyecto

inicial y es secuencial de acuerdo a [14], que categoriza como: 1) definición y planeación del proyecto, 2) especificaciones, 3) diseño conceptual, 4) desarrollo del producto, 5) soporte del producto, cada una de esas sub-fases deben pasar por un proceso de revisión y aprobación.

2.3. Metodología QFD

QFD es la sigla de Quality Function Deployment (Denominación en inglés) o Despliegue de la Función de Calidad, fue introducido en Japón a finales de los años 60 por Shigeru Mizuno y Yoji Akao, durante una época en la cual las industrias japonesas habían quebrado después de la Segunda Guerra Mundial. La metodología QFD es considerada una herramienta de planificación que permite transmitir las características de los productos, esto indica que, es el cliente quien tiene la voz principal para la creación de productos de calidad, por ello se le conoce como la casa de calidad [16], [17].

La casa de la calidad es conocida como un mapa conceptual que proporciona los medios para una correcta planificación y fluidez de las comunicaciones interfuncionales, a través de seis matrices o campos, como se muestra en la [Figura 1](#).

Tabla 1. El producto y sus ciclos de vida representados en cuatro fases

Fase I	Fase II	Fase III	Fase IV
Desarrollo del producto	Producción y entrega	Uso	Fin de Vida
Identificar necesidad	Manufactura	Limpieza	Retiro
Plan para el proceso de diseño	Ensamble	Mantenimiento	Desensamble
Desarrollo de las especificaciones	Distribución	-	Reuso o reciclaje
Desarrollo de conceptos	Instalación	-	-
Desarrollo del producto	-	-	-

Fuente: [14].

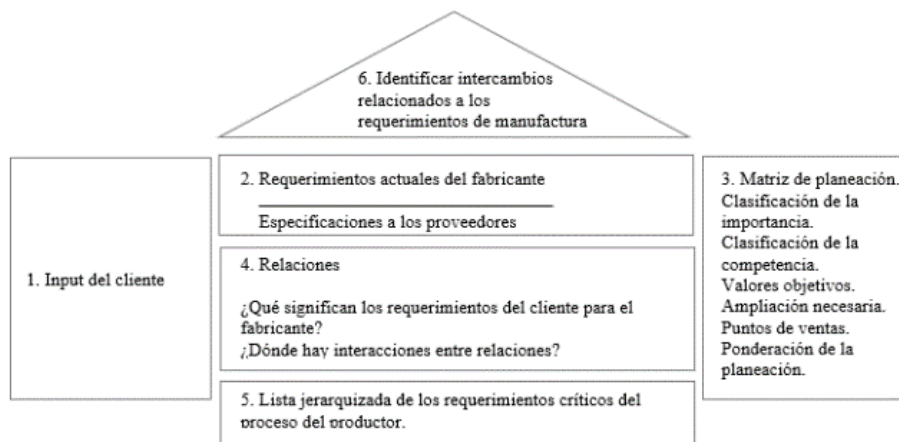


Figura 1. Estructura de la matriz Q.F.D. Fuente: Adaptado de [18], [19].

2.4. Consideraciones de diseño

La teoría del diseño es la denominación colectiva para el conocimiento pragmático que asiste al proceso de diseño, es decir, el que precede con el objetivo de llevar una idea o concepto a un producto, servicio o prototipo funcional. El prototipo del colector tubular, deberá cumplir las siguientes características generales de diseño: 1) Fácil transporte: El prototipo deberá ser sencillo de trasladar e instalar, entonces debe ser fabricado con materiales livianos. 2) Ensamble mecánico sencillo, y 3) Debe generar por lo menos entre el 50 al 60% del requerimiento energético del sistema [20].

3. Resultados y discusión

3.1. Metodología QFD

3.1.1. Requerimientos del cliente

El diseño del colector fue desarrollado para campesinos y trabajadores en zonas rurales del municipio de la Playa Belén teniendo en cuenta los siguientes requerimientos: Prototipo económico, Poco robusto, Auto sostenible energéticamente, Recolecte lluvia y humedad, Agua tratable a través de filtros y de Fácil manejo. Cada requisito tiene un valor o peso de importancia que varía de 1 a 5 de la siguiente manera, 1 poca relevancia – 5 altas relevancias como muestra la **Tabla 2**. Es importante mencionar que la valoración establecida para cada requerimiento es determinada por el cliente en función de la importancia de las especificaciones.

Tabla 2. Requerimientos del cliente y valoración de cada uno en una escala de 1 a 5

Requerimientos	Valoración
Que sea económico	5
Que sea Auto sostenible energéticamente	3
que sea un Modelo poco robusto	3
Que sea de fácil manejo	3
Que tenga capacidad de recolección de lluvia y humedad	5
Que el agua recolectada sea tratable por filtro	4

3.1.2. Especificaciones de ingeniería

El proceso de traducción de requerimientos a especificaciones de ingeniería se llevó a cabo mediante la identificación de los requerimientos del cliente y su posterior desglose en aspectos técnicos medibles y con valores objetivos. Esto se realizó en dos fases: la

primera fase consistió en identificar los requerimientos del cliente, que incluyen aspectos como el costo, la sostenibilidad energética, la facilidad de manejo, la capacidad de recolección de agua de lluvia y humedad, y la capacidad de tratamiento del agua recolectada. Estos requerimientos fueron valorados por su importancia en una escala del 1 al 5, siendo 5 la mayor importancia y 1 la menor.

Con los requerimientos de los clientes estipulados se detallaron cada uno de los aspectos técnicos a tener en cuenta que se dividieron en dos categorías (modelo de diseño energético y modelo estructural) como muestra la **Tabla 3** y **4**. En el modelo energético se plantearon tres escenarios los cuales cumplen el requisito de independencia energética en los cuales se evaluará un modelo híbrido solar-eólico, un modelo con sistema eólico y un modelo con un sistema fotovoltaico. Para el modelo estructural se plantearon dos alternativas las cuales cumplen el requisito de recolección de agua, la primera usa la superficie del tejado de la casa como fuente de recolección de agua lluvia (incluyendo un espacio para los intercambiadores que recolectaran la humedad) y soporte para el sistema energético, la segunda opción plantea un modelo estructural independiente el cual tendrá una superficie recolectora de lluvia, espacio para el sistema de refrigeración y espacio para el sistema energético.

Tabla 3. Modelos de diseño posibles del prototipo

Modelo de diseño energético
Sistema híbrido solar-eólico
Sistema eólico
Sistema fotovoltaico
Modelo estructural
Anclado al tejado de la vivienda
Estructura independiente

Teniendo en cuenta todos los requerimientos y criterios se desarrolló la matriz de decisión considerando que cada modelo energético y estructural se evaluó en una escala de 1 a 10 y se multiplico por la valoración de cada requerimiento, luego se sumaron cada uno de los valores de la siguiente manera: En el modelo de diseño energético para el sistema híbrido solar-eólico se evaluó así. Para el requerimiento de economía su calificación fue 4 debido a los altos costos multiplicado por su valoración y así cada ítem para luego sumar todas las columnas dando un ponderado de 162 como muestra la **Tabla 4**.

Es importante mencionar que para la segunda fase, los requerimientos fueron traducidos en especificaciones de

ingeniería, las cuales fueron detalladas y divididas en dos categorías: diseño energético y diseño estructural. Para cada categoría, se plantearon diferentes escenarios o soluciones técnicas que cumplieran con los requerimientos del cliente. Estas soluciones técnicas fueron evaluadas en una escala del 1 al 10 en relación con cada requerimiento, y luego se multiplicaron por el valor de importancia asignado por el cliente. La suma de estos productos proporcionó una puntuación ponderada para cada solución técnica, lo que permitió identificar cuáles eran las más adecuadas para cumplir con los requerimientos del cliente de manera óptima.

Las especificaciones de ingeniería resultantes fueron, por lo tanto, medibles y tenían valores objetivos, lo que facilitó el diseño y desarrollo del producto. Algunas de estas especificaciones incluyeron la estructura independiente del sistema, la resistencia estructural, el peso del sistema, el nivel de automatización, los materiales utilizados, la forma del sistema, las fuentes de energía renovable empleadas y el sistema de recolección de humedad y lluvia. Cada una de estas especificaciones tenía un valor numérico asignado que representaba su importancia en relación con los

requerimientos del cliente. Posteriormente, se repitieron los pasos anteriores para cada requerimiento, dando como resultado la matriz de decisión final, como se muestra en la [Tabla 5](#).

Ahora con la finalidad de definir el diseño apropiado y que este posea una estructura independiente y sistema fotovoltaico, se utilizó el despliegue de la función de calidad (QFD) o casa de la calidad como método de diseño de producto el cual almacena las demandas del cliente y las traduce en características técnicas como muestra la [Figura 2](#).

Toda la información obtenida se incorporó a la matriz QFD teniendo en cuenta cada uno de sus parámetros como se detalla a continuación:

I. Quienes o cual es el cliente al que va dirigido el diseño (Quien): El cliente al cual va dirigido el producto son los campesinos y trabajadores de la zona rural de la Playa Belén municipio de norte de Santander Colombia los cuales cuentan con escasos de agua.

Tabla 4. Matriz de decisión para el sistema solar-eólico

Requerimientos	Valoración	Sistema solar-eólico	Cuento	
Que sea económico	5	4	5×4	20
Que sea Auto sostenible energéticamente	3	10	3×10	30
que sea un Modelo poco robusto	3	3	3×3	9
Que sea de fácil manejo	3	7	3×7	21
Que tenga capacidad de recolección de lluvia y humedad	5	10	5×10	50
Que el agua recolectada sea tratable por filtro	4	8	4×8	32
Total		162		

Tabla 5. Matriz de decisión

Matriz de decisión		Modelo de diseño energético			Modelo estructural	
Requerimientos	Valoración	Sistema solar-eólico	Sistema eólico	Sistema solar	Anclado al tejado de la vivienda	Estructura independiente
		Que sea económico	5	4	1	7
Que sea Auto sostenible energéticamente	4	10	8	9	8	8
que sea un Modelo poco robusto	3	3	2	7	8	7
Que sea de fácil manejo	3	7	8	8	8	8
Que tenga capacidad de recolección de lluvia y humedad	5	10	10	10	10	10
Que el agua recolectada sea tratable por filtro	4	8	8	8	2	8
Total		162	141	189	175	181

II. Cuáles son los requerimientos que deben ser cumplidos (Que): Como quedaron definidos en la la matriz de decisión

III. Matriz quien contra que: Que ingresa el nivel de importancia que el cliente le proporciona a cada requerimiento como muestra la **Tabla 6**.

IV. Competencia (Ahora) se selecciona un producto o servicio que proporcione la misma función. La competencia directa para la necesidad del cliente es: Servicio público de agua y Pozos o fuentes naturales de agua.

En el Paso IV de la casa de la calidad, la "competencia" se refiere a otros productos o servicios similares ofrecidos por competidores en el mercado. El objetivo de este paso es identificar los estándares de la industria o las referencias competitivas relevantes para establecer valores objetivo que el producto o servicio en desarrollo debe igualar o superar. Los valores objetivo a igualar o superar pueden incluir características del producto, rendimiento, calidad, costos, tiempos de entrega, satisfacción del cliente u otros criterios relevantes para la competencia en el mercado. Identificar la competencia y establecer valores objetivo adecuados en el Paso IV es crucial para garantizar que el producto o servicio cumpla con las expectativas del mercado y tenga éxito en un entorno competitivo.

V. Especificaciones de ingeniería (Como) determinan como se dará cumplimiento a los requerimientos.

Con la matriz de decisión planteada, podemos organizar las especificaciones técnicas iniciales que cumplan con los requerimientos como muestra la **Tabla 7**. Dónde: **⊕** indica una correlación alta entre la especificación del cliente y la especificación de ingeniería que se califica como un 10, **○** indica una correlación media entre la especificación del cliente y la especificación de ingeniería que se califica como un 5, y **▲** indica una correlación baja entre la especificación del cliente y la especificación de ingeniería que se califica como un 1.0 [21].

VI. Se completa la primera casa de la calidad con los valores asignados como muestra la **Tabla 8**. Donde el valor de la evaluación absoluta para cada solución técnica (como) viene dada de la sumatoria de la calificación de cada ítem multiplicada por el peso, de esta manera vemos que los ítems de mayor relevancia a trabajar son el tipo de materiales a implementar y el sistema de energía renovable a utilizar.

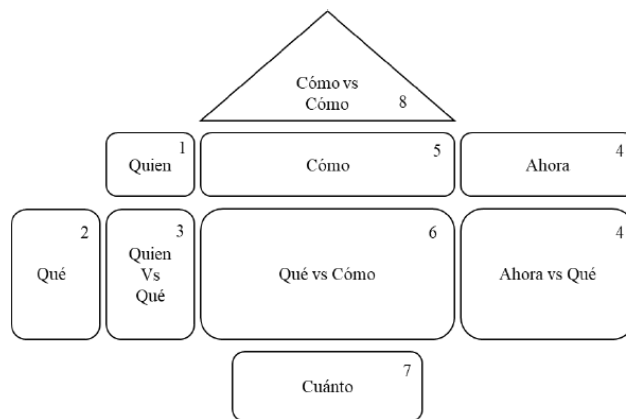


Figura 2. Matriz QFD. Fuente: [14].

Tabla 6. Requerimientos y peso de importancia

Importancia	Requerimientos del cliente
5	Que sea económico
3	Que sea auto sostenible energéticamente
3	Que sea de fácil manejo
5	Que recolecte lluvia y humedad
4	Que el agua pueda ser tratada con filtros
3	Que sea un modelo poco robusto

Tabla 7. Planteamiento matriz QFD

Especificaciones del cliente	Especificaciones de ingeniería							
	Estructura independiente	Resistencia	peso	Automatización	Materiales	Forma	Energías renovables	Sistema recolector
Que sea económico	○	▲	○	▲	⊖	○	○	▲
Que sea auto sostenible energéticamente	-	▲	▲	▲	⊖	○	⊖	○
Que sea de fácil manejo	▲		▲	⊖	▲	▲	⊖	○
Que recolecte lluvia y humedad	⊖		⊖	-	○	-	○	⊖
Que el agua recolectada pueda ser tratada con filtro	-	-	-	▲	○	▲	▲	⊖
Que sea un modelo poco robusto	⊖	○	○		⊖	⊖	○	⊖

Tabla 8. Matriz QFD

Cómo?		Peso	Estructura independiente	Resistente	con peso óptimo	Automatización	Materiales	Forma	Energías renovables	Sistema de recolección de humedad
Qué?										
Requerimientos de los clientes										
1	Que sea económico	5	5	1	5	1	10	5	5	1
2	Que sea auto sostenible energéticamente	4	0	1	1	1	10	5	10	5
3	Que sea de fácil manejo	3	1	0	1	10	1	1	10	5
4	Que recolecte lluvia y humedad del aire	5	10	0	10	0	5	0	5	10
5	Que el agua pueda ser potabilizada	4	0	0	0	1	5	1	1	10
6	Que sea un modelo poco robusto	3	10	5	5	0	10	10	5	10
Evaluación de importancia	Absoluta		108	24	97	43	168	82	139	160
	Relativa (%)		13	3	12	5	20	10	17	19

Es importante mencionar que, en la casa de la calidad, las especificaciones obtenidas del texto anterior del colector tubular híbrido se utilizan para establecer metas de ingeniería específicas que deben cumplirse durante el proceso de diseño y fabricación.

Esto implica convertir los requisitos del cliente en características técnicas y parámetros de rendimiento concretos que deben alcanzarse. Por ejemplo, el colector tubular híbrido debe tener una eficiencia térmica del 80% y una vida útil de 15 años, estas especificaciones se convierten en objetivos de ingeniería. El equipo de diseño y desarrollo trabajaría para asegurarse de que el colector tubular híbrido pueda alcanzar o superar estas metas mediante la selección adecuada de materiales, diseño de componentes, métodos de fabricación y pruebas de rendimiento.

VII. Ahora se plantearon soluciones técnicas para los cómo y se desarrolló una segunda matriz, como se muestra en la [Tabla 9](#).

Con valores la matriz obtenida anteriormente, se obtiene la [Tabla 10](#), donde podemos apreciar en la que debemos centrarnos para el buen desarrollo del diseño. En el texto marcado en color rojo podemos apreciar el valor absoluto de los resultados que nos muestra el peso o valor de importancia de cada ítem en el diseño. Podemos observar que los 3 valores más altos son para estructura en forma de árbol con 235 puntos o un 20%, sistema energético fotovoltaico con 280 puntos o un 24% y un condensador de humedad del aire con un valor de 17 puntos o 17% valores resaltados en la tabla en los que debe centrarse el diseño [22], [23].

Tabla 9. Planteamiento de la segunda matriz QFD

Requerimientos	Como?						
	▼ Estructura en acero	▲ Anclado al suelo	▲ Sistema con PLC en bombas	▲ Estructura en forma de árbol	▲ Recubrimiento en guadua	▲ Sistema fotovoltaico	▲ Condensador de humedad del aire
Estructura independiente	⊖	○	-	⊖	○	⊖	▲
Resistencia	⊖	○	-	⊖	▲	▲	-
Peso	⊖	▲	-	⊖	⊖	○	▲
Automatización	▲	-	⊖	▲	-	⊖	○
Materiales	○	▲	-	▲	⊖	○	▲
Formas	⊖	▲	-	⊖	▲	○	▲
Energías renovables	▲	▲	-	○	-	⊖	○
Sistema de recolección de humedad	▲	▲	▲	▲	▲	⊖	⊖

Tabla 10. Segunda matriz QFD

Cómo?		Peso	Estructura en acero	Anclado al suelo	Sistema PLC en bombas	Estructura en forma de árbol	Recubrimiento en guadua	Sistema energético fotovoltaico	Condensador de humedad del aire
Qué?									
Requerimientos de los clientes									
1	Estructura independiente	5	10	10	5	10	5	10	5
2	Resistencia	4	5	5	0	10	5	5	1
3	Peso	3	10	5	1	5	10	5	5
4	Automatización	5	0	0	10	5	0	10	10
5	Materiales	4	5	5	1	5	5	10	5
6	Formas	3	10	0	1	10	1	10	5
7	Energías renovables	5	0	0	5	10	1	10	5
8	Sistema de recolección de humedad	5	0	0	0	1	0	5	10
Evaluación de importancia	Absoluta		150	105	110	235	103	280	204
	Relativa (%)		13	9	9	20	9	24	17

3.2. Especificaciones de diseño mecánico para sistemas de captación de agua lluvia

Con la finalidad de tener un diseño conceptual, se procedió a darle forma en el software de modelado Solidwork [24]. Inicialmente se planteó un rectángulo de 5.2×3.0 m de los cuales se fue dando forma de hojas de árbol. Desde la vista superior, podemos apreciar la geometría como muestra la Figura 3.

Considerando lo anterior, las metas de diseño se llevan al diseño conceptual a través de un proceso iterativo que implica la generación de múltiples conceptos de diseño seguidos de una evaluación para seleccionar el más adecuado (considerando los puntajes más altos) [19]. A conitnuación se presenta una descripción general del proceso:

- Identificación de metas de diseño: Las metas de diseño se derivan de los requisitos del cliente, las especificaciones del producto y los objetivos del proyecto. Estas metas pueden incluir características técnicas, requisitos de rendimiento, restricciones de costos, consideraciones ergonómicas, criterios de fabricación, entre otros.
- Generación de conceptos de diseño: Una vez que se identifican las metas de diseño, se generan múltiples conceptos de diseño que pueden cumplir con esas metas. Estos conceptos pueden variar en términos de enfoque, tecnología utilizada, apariencia, funcionalidad y otros aspectos. La generación de conceptos puede realizarse mediante lluvias de

ideas, simulaciones por ordenador, prototipos rápidos, entre otros métodos.

- Evaluación de conceptos de diseño: Los conceptos de diseño generados se evalúan en función de diversos criterios, que pueden incluir la viabilidad técnica, la adecuación para cumplir con las metas de diseño, la facilidad de fabricación, el coste estimado, la aceptación del cliente y otros factores relevantes. Esto puede implicar la creación de modelos conceptuales, prototipos virtuales o físicos, pruebas de rendimiento, encuestas de opinión de los usuarios, análisis de riesgos y otros métodos de evaluación.
- Selección del diseño final: Basándose en los resultados de la evaluación de los conceptos de diseño, se selecciona un diseño final que mejor cumpla con las metas de diseño establecidas. Este diseño final se convierte en la base para el desarrollo del prototipo.

El número de conceptos generados puede variar según el proyecto y la complejidad del producto o servicio en cuestión. A menudo, se generan múltiples conceptos para explorar una variedad de enfoques posibles antes de seleccionar el más prometedor. Por lo tanto, las metas de diseño se llevan al diseño conceptual a través de un proceso de generación y evaluación de múltiples conceptos de diseño, que culmina en la selección del diseño final para el desarrollo del prototipo.

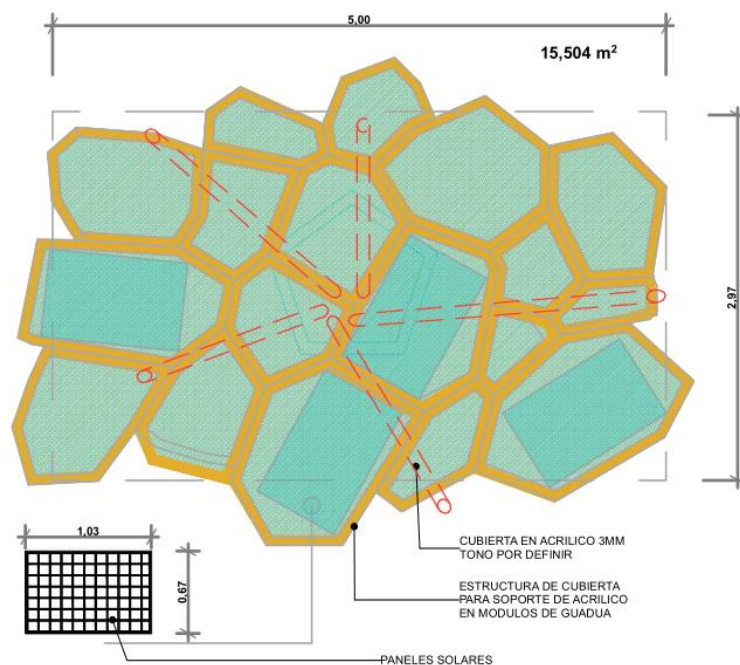


Figura 3. Superficie de recolección de agua lluvia diseñada en Solidwork. Fuente: elaboración propia.

La superficie colectora es sostenida estructuralmente por 5 barras de guadua con vaciado en concreto para un mayor soporte estructural como muestra la **Figura 4**.

3.3. Especificaciones de diseño mecánico de la estructura

En la superficie superior se encuentran fijados los paneles solares del sistema fotovoltaico como muestra la **Figura 5**. Los paneles solares brindan la energía fotovoltaica necesaria al sistema para el funcionamiento del ciclo de refrigeración y las bombas de succión para el agua. El diseño brinda la posibilidad de agregar hasta un panel solar extra con el fin de brindar mayor energía al sistema.

Por otro lado, y teniendo en cuenta que la superficie colectora brinda dos aplicaciones al sistema (colectora de agua lluvia y superficie para los paneles solares), se emplea la estructura de soporte (las barras en guadua sellada) como conductos de distribución del agua lluvia desde la superficie colectora hasta los tanques de almacenamiento, las barras de soporte están unidas entre sí a través de barras metálicas que garantizan un mayor soporte en la estructura como muestra la **Figura 6**. En la **Figura 7**, podemos apreciar los bocines de soporte en la estructura y la tubería de conexión a los tanques.

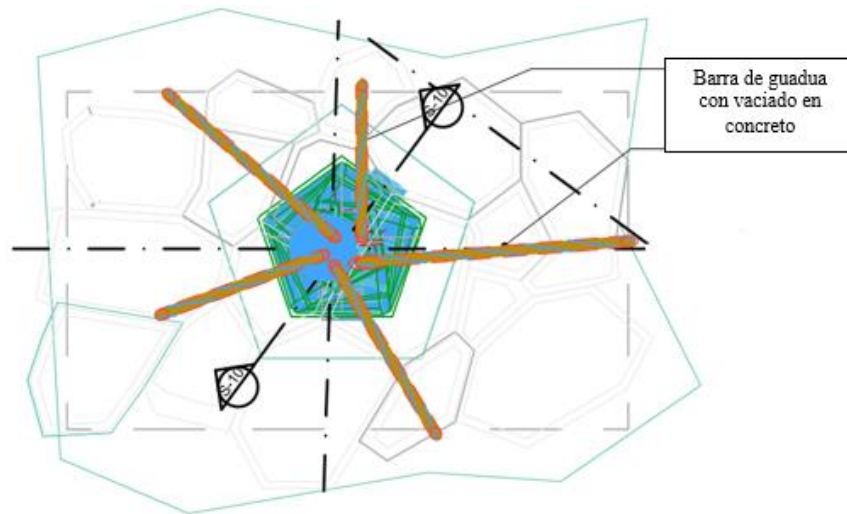


Figura 4. Vista superior estructura con superficie superior traslúcida. Fuente: elaboración propia.

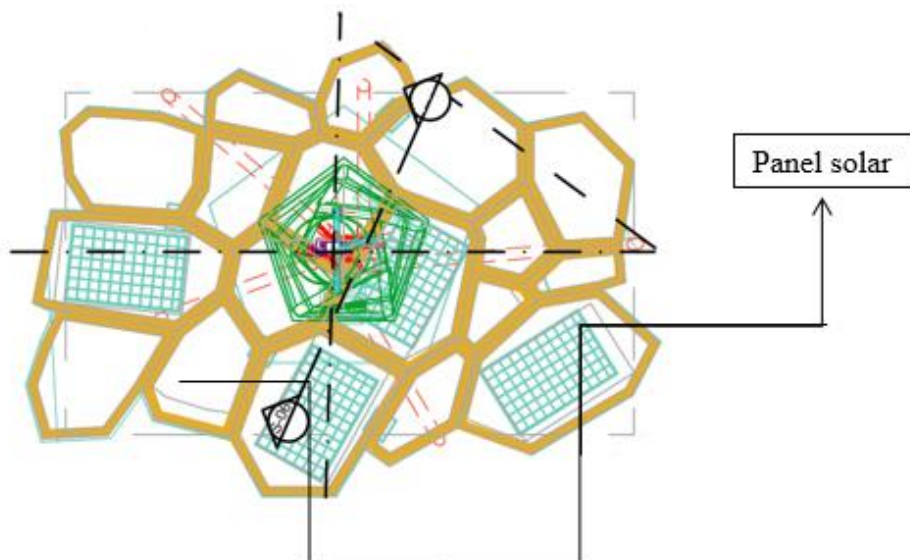


Figura 5. Superficie colectora y paneles solares. Fuente: elaboración propia.

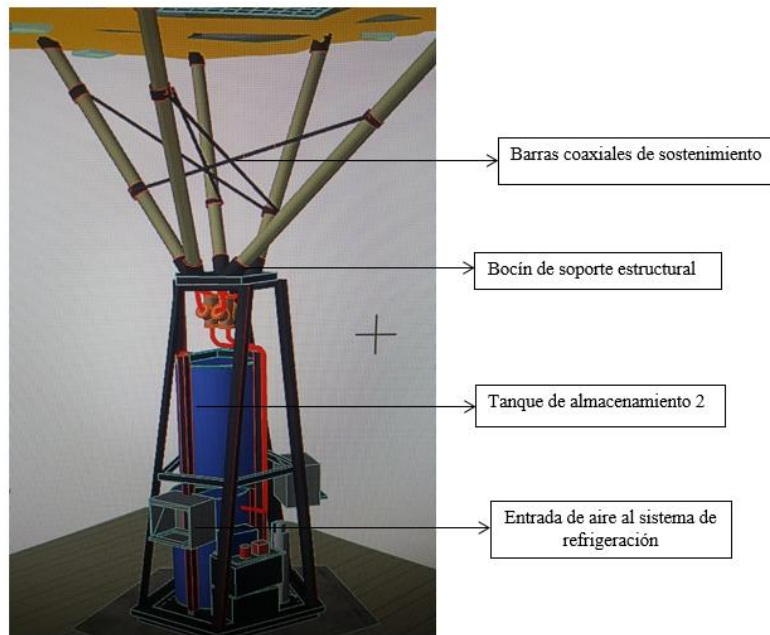


Figura 6. Barras de soporte coaxiales. Fuente: elaboración propia.

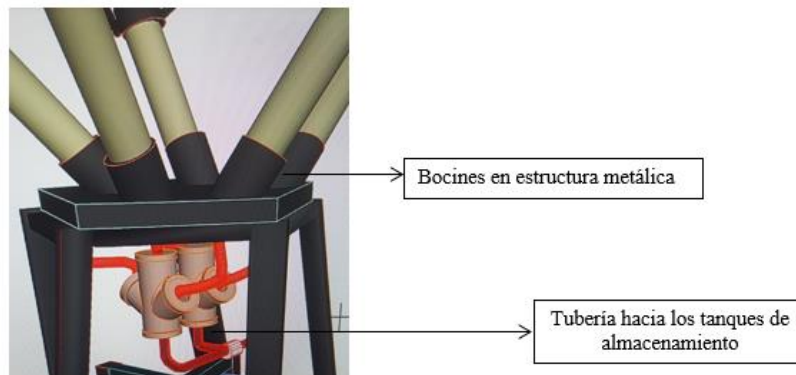


Figura 7. Sistema de conducción de agua lluvia. Fuente: elaboración propia.

El sistema de anclaje de la estructura al concreto está conformado de pernos de expansión, pernos de anclaje o pernos de concreto, que se insertan en perforaciones preperforadas en el concreto y se aseguran mediante un mecanismo de expansión o bloqueo. El sistema de anclaje depende de consideraciones técnicas como la carga estructural, la resistencia del concreto, la accesibilidad al sitio y los requisitos de resistencia a la corrosión.

Como es detallado en el análisis QFD, la estructura tendrá forma de árbol con dos tanques de almacenamiento en su interior, cada uno con una capacidad de 250l, el agua de lluvia y humedad entrante al sistema ingresa al tanque de la superficie inferior y es bombeado al tanque superior donde pasa previamente por un filtro de carbon

activado, esta agua disponible puede ser enviada a un tercer tanque de almacenamiento o ser usada a través de un grifo con funcionamiento por gravedad a través de uno de los orificios ubicados en los costados de la estructura, orificios por los cuales entra y sale el aire del sistema de refrigeración. La estructura cuenta con una caja negra de almacenamiento de los equipos del sistema fotovoltaico (Baterías, etc.) como puede apreciarse en la [Figura 8](#). Cabe destacar que la estructura cuenta con un anclaje al suelo con concreto, con el fin de garantizar la estabilidad estructural.

La entrada y salida del aire del ciclo de refrigeración por convección natural está dispuesta en los laterales como muestra la [Figura 9](#), a través de los orificios también se podrá disponer mangueras para el uso y distribución del agua potable por medio de un grifo común.

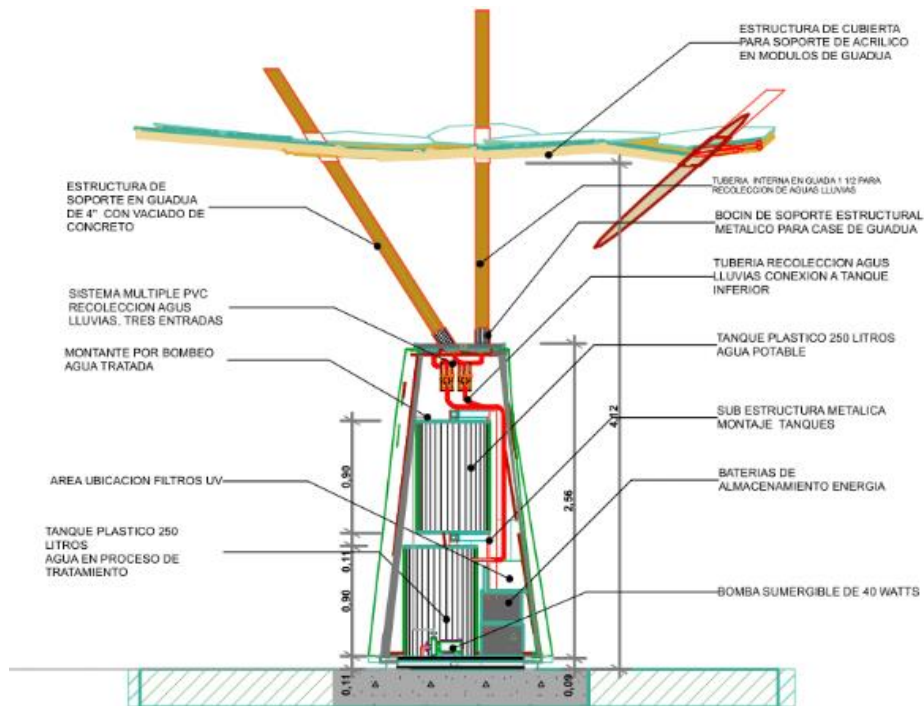


Figura 8. Estructura interna del sistema colector. Diseño en Solidwork. Fuente: elaboración propia.

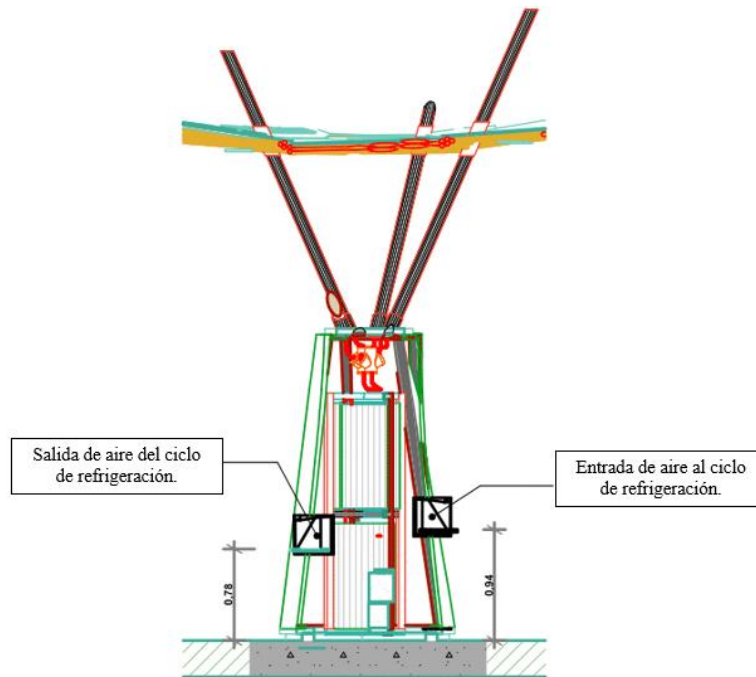


Figura 9. Entrada y salida de aire del sistema colector. Diseño en Solidwork. Fuente: elaboración propia.

La **Figura 10** muestra las entradas del prototipo en 3 dimensiones. El ciclo de refrigeración que genera 24 litros de agua diario que van directamente al tanque inferior proporciona un abastecimiento pequeño pero constante diariamente que es útil en los meses del año que presentan poca precipitación. El diseño piramidal de

la estructura metálica nace de una base pentagonal solo con el fin de realizar un modelo con características estéticas y siguiendo la hegemonía de un árbol con una base gruesa que va disminuyendo su grosor como muestra la **Figura 11**.

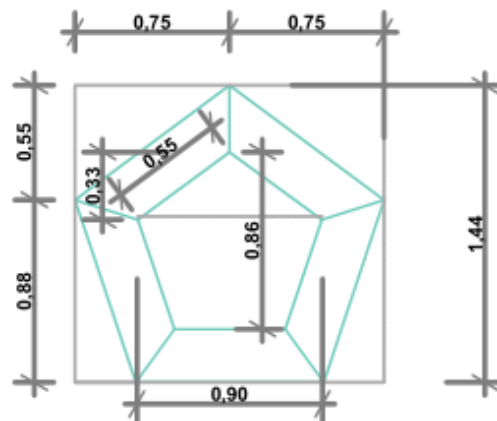


Figura 10. Vista superior de base pentagonal. Diseño en Solidwork. Fuente: elaboración propia

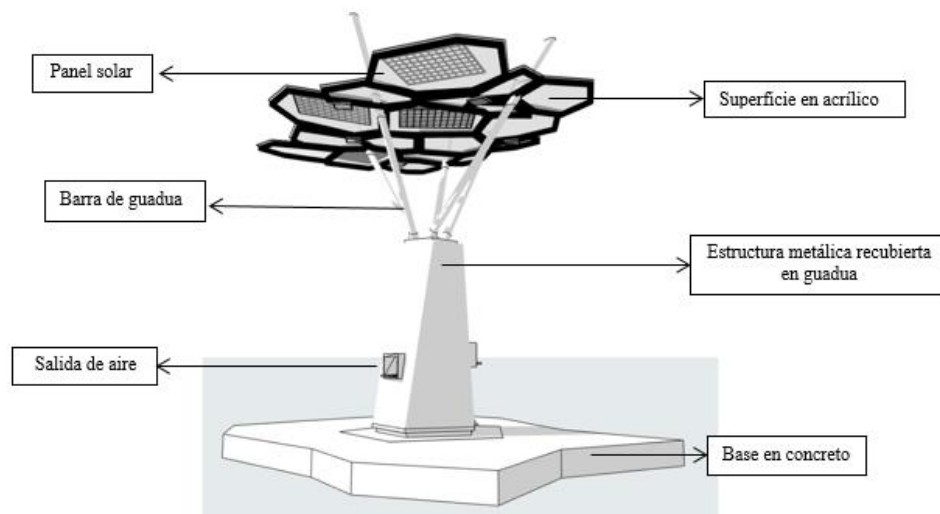


Figura 11. Vista isométrica del colector de agua. Diseño en Solidwork. Fuente: elaboración propia.

En la **Figura 12** y la **Figura 13** se muestra una vista isométrica del diseño del colector mecánico de humedad y lluvia, todo el sistema hidráulico y eléctrico se encuentra en el interior con dos orificios comunicantes por los cuales se puede disponer del agua recolectada. Nótese que la estructura en la que se puede apreciar el recubrimiento en guadua y el acrílico de la superficie colector y la estructura al lado de una persona de estatura promedio (1.74 m).

Finalmente, es importante mencionar que la guadua es una especie forestal característica en Colombia que pertenece a la familia del bambú. Esta planta es usada en la construcción por sus propiedades físico-mecánicas de flexibilidad, resistencia y dureza. En un estudio desarrollado por Xu et al. [25] mostro que el uso sostenible de la guadua como material estructural proporciona alta fiabilidad y economía. En el presente proyecto se decidió utilizar la guadua sellada e impermeabilizada como material estructural y de

aislamiento de los sistemas internos de la estructura, la utilización de la guadua no es recomendable a gran escala por la deforestación, sin embargo, la utilización sostenible provee un material altamente flexible, duradero y económico con diseños estéticos.

4. Conclusiones

El desarrollo del colector tubular para la localidad de la playa de Belén con una inversión inicial de \$ 7'757,000 pesos es viable a largo plazo (16 años de retorno de inversión, basado en calculos de materiales a la fecha y sin incluir costos de manufactura). Uno de los costos más altos del desarrollo del proyecto es el sistema fotovoltaico con más de un 40% en peso, de no tenerlo en cuenta y solo se recolectará agua por medio de la lluvia, el retorno de la inversión pasaría de 15 a 9 años; sin embargo, los días con alta sequia no se tendría disponibilidad de agua siendo el aporte con el sistema de refrigeración de más de 20 litros diarios.

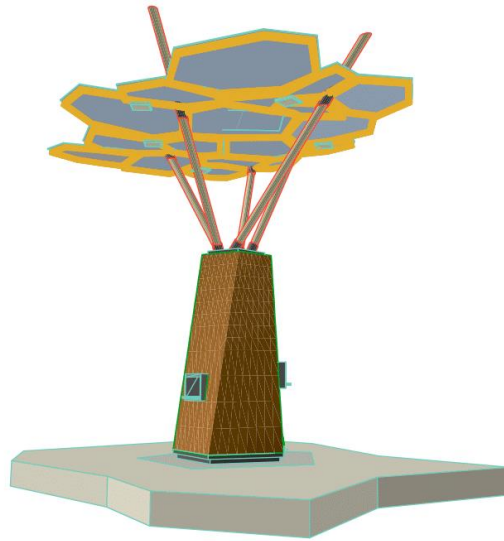


Figura 12. Diseño de estructura con renderizado base. Fuente: elaboración propia.



Figura 13. Diseño de estructura II con renderizado base. Fuente: elaboración propia.

El desarrollo del diseño mecánico se llevó a cabo con ayuda de la metodología QFD, la cual nos brindó las herramientas para el modelado de un sistema adecuado de recolección de agua lluvia y humedad que fuese económico, energéticamente independiente y de fácil implementación y manejo. La estructura colectora de agua lluvia en acrílico proporciona una dureza y resistencia adecuada (siendo la energía necesaria para romper el material de 4.7 lb/ft) para la carga de lluvia y el peso de los paneles solares, debido a que su resistencia es superior a la de un techo convencional elaborado de tejas. Por otra parte, el diseño es visualmente agradable, siendo óptimo para su instalación en parques y entradas de centros comerciales ya que proporciona agua potable, energía y sombra. Un

diseño sin la implementación del sistema de refrigeración podría brindar una solución para el abastecimiento de agua en localidades que no cuenten con agua potable y la cantidad de lluvia anual supere los 150 días.

El municipio de la playa Belén es un lugar adecuado para proyectos de generación de energía solar por su alta irradiación y baja nubosidad. Como recomendación, se deben considerar los siguientes aspectos: No es recomendable la implementación de turbinas eólicas en el municipio la Playa Belén debido a la baja velocidad del viento (bajo potencial eólico), se recomienda limpiar mantener los paneles solares del sistema fotovoltaico libres de suciedad, para centros comerciales el diseño

puede incluir tomas eléctricas, red wifi, lavamanos y asientos con el fin de brindar comodidad en la ciudad.

Financiación

No aplica.

Contribución de los autores

R. García-León: conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, redacción – borrador original. A. R. Cervantes-Padilla: metodología, validación, visualización, redacción –revisión y edición. G. Guerrero-Gómez: conceptualización, supervisión, metodología, validación, visualización, redacción – borrador original, redacción –revisión y edición.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

[1] R. Quiroga-Martínez, “Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible: avances y perspectivas para América Latina y el Caribe,” Chile, 2007.

[2] A. H. Correa Sastoque, “Diseño de un sistema de captación y aprovechamiento de aguas lluvias como alternativa de ahorro de agua potable en la Universidad Libre de Colombia, sede Bosque Popular, bloque P y cafetería,” Universidad Libre, 2014.

[3] M. P. Ricardo Calzadilla, A. Gómez Arias, R. Martín Fernández, V. Cutie Cansino, and O. Martínez Díaz, “Estudio de las precipitaciones para el diseño de sistema de captación de agua de lluvia,” *Rev. Ing. Agrícola*; vol. 10, Núm. 2, 2020.

[4] N. A. López Hernández, O. L. Palacios-Vélez, M. Anaya-Garduño, J. Chávez-Morales, J. E. Rubiños-Panta, M. García-Carrillo, “Diseño de sistemas de captación del agua de lluvia: alternativa de abastecimiento hídrico,” *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas*, vol. 8, no. 6, pp. 1433–1439, 2017, doi: <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i6.314>

[5] S. Devetak Álvarez, “Plataforma contra la desertificación. Atrapanieblas. Agua, difusión e innovación tecnológica IV región, Chile,” Universidad de Chile, 2014.

[6] BBC-News, “Chile: los atrapanieblas que capturan agua en Atacama, uno de los lugares más secos del mundo,” BBC, 2015. https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/05/150521_atrapanieblas_chile_desierto_lp.

[7] G. Y. Muñoz Martínez, J. S. Suárez Guerrero, “Rain Wall: Sistema vertical que implementa la recolección de aguas lluvias y cultivos hidropónicos.” Universidad Gran Colombia, Bogotá, Colombia, pp. 1–123, 2020.

[8] Y. Mosquera and M. Ramírez, “Obtención de Agua Mediante Condensación de la Humedad del Aire de la Ciudad de Santa Marta,” Universidad Antonio Nariño, 2020.

[9] Z. M. Ruiz Garzón, A. D. Peña Vega, and M. A. Cardoso Polania, “Diseño de sistema para el aprovechamiento de agua lluvia y ahorro de agua potable en el colegio la nueva esperanza del municipio de la calera - Cundinamarca,” Universidad Gran Colombia, 2018.

[10] W. D. Velandia-Bernal, W. A. Ortiz-Forero, “Propuesta para la captación y uso de agua lluvia en las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia a partir de un modelo de recolección de agua,” Universidad Católica de Colombia, 2017.

[11] A. K. Quintero-Ortiz, “Diseño de un sistema de riego con reservorio como alternativa de aprovechamiento de aguas lluvias en la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña,” Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, 2017.

- [12] C. M. Peñaloza-Velásquez, M. A. Peñaloza-Velásquez, “Evaluación de un sistema piloto de captación de agua mediante la tecnología de aprovechamiento de la niebla en sectores estratégicos del municipio de Ocaña,” Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, 2020.
- [13] IDEAM, “Metodología de la operación estadística de variables meteorológicas,” Colombia, 2018. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72085840/Documento+metodologico+variables+meteorologicas.pdf/8a71a9b4-7dd7-4af4-b98e-9b1eda3b8744>
- [14] D. Ullman, *The mechanical design process*. New York: McGraw-Hill, 2010.
- [15] K. V. Clavijo Bernal, J. F. Araujo Arrieta, E. S. Ortega Vivas, “Estudio de factibilidad para la implementación de un sistema pluvial ecosostenible.” Universidad Gran Colombia, Bogotá, Colombia, 2017.
- [16] C. Arroyave, A. Maya, and C. Orozco, “Aplicación de la metodología QFD en el proceso de ingeniería de requisitos,” Universidad EAFIT, 2007.
- [17] E. A. Rodríguez Gasca, E. de J. Cortés Torres, and C. A. Cortés Peña, “Aplicación de la metodología QFD en el desarrollo de una impresora 3D,” *Rev. Colomb. Tecnol.*, vol. 2, no. 28, pp. 47–54, 2016, doi: <https://doi.org/10.24054/16927257.v28.n28.2016.2463>
- [18] J. EL Mesbahi, I. Buj-Corral, A. EL Mesbahi, “Use of the QFD method to redesign a new extrusion system for a printing machine for ceramics,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 111, no. 1–2, pp. 227–242, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05874-x>
- [19] R. A. García-León, W. Jaimes-Gonzalez, L. D. Becerra, E. Flórez-Solano, M. Cabellos-Martínez, D. Meneses-Torres, “Application of the QFD method to the design of a cocoa pulping machine,” *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, pp. 1–12, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01416-0>
- [20] E. Flórez-Solano, R. A. García-León, E. Sanchez-Ortiz, “Diseño de un sistema alimentador para un horno rotatorio en la producción de fosfato en norte de Santander,” *Rev. Colomb. Tecnol.* vol. 1, no. 29, pp. 70–80, 2017, doi: <https://doi.org/10.24054/rcta.v1i29.192>
- [21] V. Sengazani Murugesan, A. H. Sequeira, S. K. Jauhar, V. Kumar, “Sustainable postal service design: integrating quality function deployment from the customers perspective,” *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, vol. 11, no. 2, pp. 494–505, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s13198-019-00906-6>
- [22] T. Lager, “The industrial usability of quality function deployment: A literature review and synthesis on a meta-level,” *R D Manag.*, vol. 35, no. 4, pp. 409–426, 2005, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9310.2005.00398.x>
- [23] R. A. García-León, M. Rodríguez-Castilla, W. Quintero-Quintero, “Analysis of a molding machine using methodologies and theories of design,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1708, p. 012026, 2020, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1708/1/012026>
- [24] SolidBI, “Solidworks - Qué es y para qué sirve,” WebPage, 2020.
- [25] P. Xu, J. Zhu, H. Li, Y. Wei, Z. Xiong, X. Xu, “Are bamboo construction materials environmentally friendly? A life cycle environmental impact analysis,” *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 96, p. 106853, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ear.2022.106853>



Disponible en:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=553781612012>

Cómo citar el artículo

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista en redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de revistas científicas de Acceso Abierto diamante
Infraestructura abierta no comercial propiedad de la
academia

Ricardo García-León, Armando Rafael Cervantes-Padilla,
Gustavo Guerrero-Gómez

**Aplicación de la metodología QFD al diseño de un colector
tubular híbrido de humedad residual del medio ambiente
y lluvia**

**Application of the QFD methodology to the design of a
hybrid tubular collector of residual moisture from the
environment and rainfall**

Revista UIS ingenierías

vol. 23, núm. 1, p. 141 - 158, 2024

Universidad Industrial de Santander,

ISSN: 1657-4583

ISSN-E: 2145-8456

DOI: <https://doi.org/10.18273/revuin.v23n1-2024012>