

Corporación Universitaria Comfauca - Unicomfauca

Facultad de Ingeniería, Ingeniería Mecatrónica.

Especialización en Sistemas Inteligentes Aplicado al Internet de
las Cosas.

Desarrollo de un Sistema de Destilación Solar para la
Purificación de Agua en las Zonas Rurales de Popayán
Basado en Internet de las Cosas.

Autor:

Oscar Hernan Mosquera Trujillo, Juan David Samboni Cordoba.;

Director:

Saul Eduardo Ruiz Sarzosa;

Popayán – Cauca

2024

Desarrollo de un Sistema de Destilación Solar para la Purificación de Agua en las Zonas Rurales de Popayán Basado en Internet de las Cosas.

Develop a Solar Distillation System for Water Purification in the Rural Areas of Popayán Based on the Internet of Things.

Resumen

El proyecto se enfoca en el diseño y desarrollo de un destilador solar para purificar agua en áreas rurales de Popayán, Cauca, Colombia, mediante tecnología del Internet de las Cosas (IoT). Para ello, se llevaron a cabo varios procesos. Primero, se realizó un análisis exhaustivo de las necesidades y condiciones específicas de las comunidades rurales en términos de acceso al agua potable y la viabilidad de la energía solar para la purificación. Luego, se procedió con el diseño CAD/CAM del destilador solar, identificando sensores y dispositivos IoT para monitorear y controlar el proceso de purificación de manera eficiente y automatizada. Este enfoque busca mejorar la calidad del agua, reducir la incidencia de enfermedades transmitidas por la misma y contribuir a la sostenibilidad y equidad en el acceso al recurso hídrico en estas comunidades. El destilador solar no solo aprovecha una fuente de energía renovable y abundante en la región, sino que también incorpora tecnología moderna para garantizar un proceso de purificación efectivo y seguro, con el potencial de tener un impacto significativo en la salud y el bienestar de las poblaciones rurales.

Palabras clave: Destilador solar, Purificación de agua, Internet de las Cosas (IoT), Sensores, Automatización

Abstract

The project focuses on the design and development of a solar distiller to purify water in rural areas of Popayán, Cauca, Colombia, using Internet of Things (IoT) technology. Several processes were carried out for this purpose. Initially, a comprehensive analysis of the specific needs and conditions of rural communities regarding access to clean water and the feasibility of solar energy for purification was conducted. Subsequently, the CAD/CAM design of the solar distiller was carried out, identifying sensors and IoT devices to monitor and control the purification process efficiently and automatically. This approach aims to improve water quality, reduce the incidence of waterborne diseases, and contribute to sustainability and equity in accessing water resources in these communities. The solar distiller not only harnesses a renewable and abundant energy source in the region but also incorporates modern technology to ensure an effective and safe purification process, with the potential to have a significant impact on the health and well-being of rural populations.

Keywords: Solar distiller, Water purification, Internet of Things (IoT), Sensors, Automation

1. Introducción

El acceso a agua potable es un derecho humano fundamental reconocido internacionalmente. Sin embargo, a pesar de los avances en infraestructura y tecnología, muchas comunidades en el mundo todavía enfrentan desafíos significativos para acceder a este recurso vital. Según el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023, aproximadamente 2.000 millones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de forma segura. Además, alrededor de 3.600 millones de personas carecen de acceso a servicios de saneamiento adecuados, lo que exacerba los problemas de salud pública y la calidad de vida. [1]

En Colombia, la situación es igualmente preocupante, especialmente en las zonas rurales. Aunque el país se destaca por su abundante oferta hídrica natural, con un rendimiento hídrico nacional de 56 l/s-km², superando el promedio mundial de 10 l/s-km², muchas áreas rurales siguen sin acceso a agua potable segura. En Popayán, una ciudad con altos estándares de purificación de agua según la resolución 2115 de 2007, las zonas rurales circundantes dependen de fuentes naturales no tratadas, lo que conlleva graves riesgos para la salud debido a la contaminación del agua. [2]

La problemática del acceso al agua potable en estas zonas rurales se ve agravada por varios factores. Primero, la infraestructura de distribución de agua es limitada o inexistente, lo que obliga a las comunidades a depender de pozos subterráneos, ríos y arroyos. Segundo, la temporada de lluvias, que generalmente dura cuatro meses al año, no es suficiente para recargar las reservas de agua en represas y aljibes, aumentando la vulnerabilidad a la escasez de agua. Tercero, la contaminación del agua por microorganismos patógenos, productos químicos tóxicos y otros contaminantes representa una amenaza constante para la salud pública. [3]

Frente a esta situación, la implementación de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) en sistemas de purificación de agua surge como una solución innovadora y prometedora. La IoT permite el monitoreo y control remoto de sistemas, lo que facilita la gestión eficiente y sostenible de recursos hídricos. Este artículo propone el desarrollo de un sistema de destilación solar basado en IoT para mejorar la calidad del agua en las zonas rurales de Popayán. La idea de utilizar la destilación solar no es nueva; de hecho, ha sido utilizada desde tiempos antiguos para obtener agua potable. Los destiladores solares emulan el ciclo hidrológico natural, permitiendo la

evaporación y posterior condensación del agua, eliminando impurezas y contaminantes en el proceso. [4]

El desarrollo del sistema propuesto incluye la integración de sensores y actuadores controlados por un microcontrolador ESP32, que monitorean parámetros críticos como la temperatura, humedad, pH y turbidez del agua. Además, se incorporará un filtro ultravioleta para asegurar la eliminación de microorganismos patógenos. Este enfoque no solo busca mejorar la calidad del agua, sino también reducir la incidencia de enfermedades transmitidas por el agua y promover un acceso equitativo y sostenible al recurso hídrico en las comunidades rurales.

2. Marco Teórico

El marco teórico de este proyecto se basa en la comprensión de varios conceptos clave relacionados con la destilación solar, la tecnología del Internet de las Cosas (IoT), y los métodos de purificación del agua. A continuación, se presentan definiciones y explicaciones detalladas de estos conceptos.

2.2 Destilación Solar

Destilación Solar: La destilación solar es un proceso de purificación del agua que utiliza la energía del sol para evaporar el agua, separándose de sus impurezas. El vapor de agua generado se condensa luego en una superficie fría, recolectando como agua destilada. Este proceso se basa en el ciclo hidrológico natural, donde el agua se evapora del suelo y cuerpos de agua, se eleva en la atmósfera y luego se condensa en forma de lluvia. [5]

2.3 Tecnología del Internet de las Cosas (IoT)

Internet de las Cosas (IoT): El IoT se refiere a la interconexión de dispositivos físicos a través de internet, permitiendo que estos dispositivos recopilen y compartan datos. Estos dispositivos pueden incluir sensores, actuadores, y microcontroladores que monitorean y controlan diversos sistemas de manera automática y remota. [6]

2.4 Componentes Clave del IoT:

Sensores: Dispositivos que recopilan datos del entorno, como temperatura, humedad, pH y turbidez del agua.

Actuadores: Dispositivos que realizan acciones en respuesta a los datos recopilados por los sensores, como ajustar válvulas o activar filtros.

Microcontroladores: Dispositivos que procesan los datos de los sensores y controla los actuadores. En este proyecto, se utilizará un ESP32.

Red de Comunicación: Infraestructura que permite la transmisión de datos entre los dispositivos IoT y un servidor central o una aplicación móvil. [7]

2.5 Aplicaciones del IoT en la Purificación del Agua:

Monitoreo Remoto: Permite la vigilancia continua de la calidad del agua y el rendimiento del destilador solar.

Control Automatizado: Mejora la eficiencia del proceso de destilación ajustando parámetros en tiempo real.

Alertas y Notificaciones: Envía alertas a los usuarios en caso de fallos del sistema o cambios en la calidad del agua. [7]

3. Metodología.

El desarrollo del prototipo de destilador solar implementando tecnologías de IoT se basó en las siguientes etapas:

1. Diseño de la Estructura de Destilación Solar.

Esta fase se centró en el diseño del destilador solar y en la investigación de las condiciones locales en Popayán:

1.1 Estudio de Condiciones Locales

Para el desarrollo de un destilador solar eficiente en las zonas rurales de Popayán, Cauca, Colombia, se realizó un análisis detallado de las condiciones locales. Este análisis incluyó la evaluación de la disponibilidad de recursos solares, la calidad del agua en las áreas rurales, y otros factores ambientales y socioeconómicos que influyen en la viabilidad del proyecto. A continuación, se presentan los principales hallazgos del estudio:

1.2 Disponibilidad de Recursos Solares

Radiación Solar Promedio:

Popayán, situada en el suroeste de Colombia, cuenta con una ubicación geográfica favorable para la captación de energía solar. La región recibe una radiación solar promedio de aproximadamente 4.5 a 5.0 kWh/m²/día, lo cual es adecuado para el funcionamiento de destiladores solares.

Esta radiación solar varía ligeramente a lo largo del año, con picos durante las estaciones secas (junio a agosto y diciembre a febrero) y menores valores durante

la temporada de lluvias (marzo a mayo y septiembre a noviembre).

Temperaturas Ambientales:

Las temperaturas promedio en Popayán oscilan entre 14°C y 24°C durante todo el año, con variaciones diurnas significativas. Estas temperaturas son adecuadas para la operación de un destilador solar, ya que el calor ambiental complementa el proceso de evaporación del agua. [8]

1.3 Calidad del Agua en Zonas Rurales

Fuentes de Agua:

Las comunidades rurales en Popayán dependen principalmente de ríos, arroyos, pozos y manantiales naturales para su suministro de agua. Estas fuentes, aunque abundantes, suelen estar expuestas a diversas formas de contaminación. [8]

Contaminantes Comunes:

Microorganismos patógenos: Bacterias, virus y protozoos son comunes en las fuentes de agua superficiales y subterráneas, lo que representa un riesgo significativo para la salud pública.

Productos químicos: La presencia de productos agrícolas como pesticidas y fertilizantes en el agua de ríos y arroyos es una preocupación adicional.

Sedimentos y turbidez: Las lluvias intensas y la escorrentía superficial contribuyen a altos niveles de sedimentos y turbidez, afectando la calidad del agua. [9]

1.2 Diseño CAD de la Estructura.

El proceso de diseño del destilador solar se basó en una investigación que comprendió el análisis de diversos modelos existentes y la evaluación de las tecnologías más adecuadas para maximizar la eficiencia y la efectividad del sistema. Utilizando software de diseño asistido por computadora (CAD), se desarrolló una estructura de destilación solar que cumple con los requisitos específicos de rendimiento y durabilidad.

La estructura del destilador se diseñó siguiendo un enfoque tipo caseta, una disposición comúnmente adoptada en este tipo de sistemas debido a su eficiencia y facilidad de implementación.

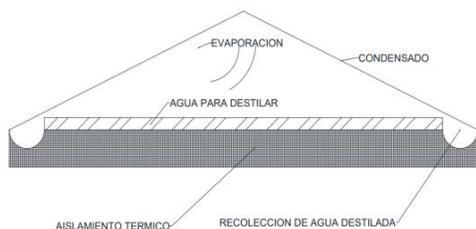


Figura 1. Diseño general de un destilador tipo caseta. Fuente: Tomado de Flores-Valencia, M. A. (2021). [10]

Esta configuración se eligió cuidadosamente teniendo en cuenta la inclinación óptima del techo para maximizar la captación de radiación solar durante todo el día, garantizando así un rendimiento óptimo incluso en condiciones climáticas variables.

El destilador solar tipo caseta presenta una estructura rectangular con un techo inclinado cubierto por un material transparente, como vidrio o láminas de plástico de alta calidad. Esta cubierta transparente permite que la luz solar penetre en el interior del destilador mientras protege el sistema de las condiciones climáticas adversas.

Dentro del destilador, se incorpora un recipiente de vidrio diseñado para contener el agua contaminada. Este recipiente se coloca estratégicamente en la parte inferior del destilador, donde recibe directamente la radiación solar incidente.

A medida que el agua se calienta, su temperatura aumenta, provocando su evaporación y generando vapor de agua en el interior del destilador.

El vapor de agua ascendente se encuentra con la superficie transparente del techo, donde se produce la condensación debido a las diferencias de temperatura. La condensación resultante se acumula en un recipiente de recolección especialmente diseñado ubicado en la parte frontal del destilador.

Este recipiente actúa como un canal de recolección que dirige el agua condensada hacia un contenedor de almacenamiento ubicado en la base del destilador.

Este diseño proporciona un flujo eficiente y continuo de agua purificada, aprovechando al máximo la energía solar disponible para eliminar impurezas y contaminantes del agua contaminada.

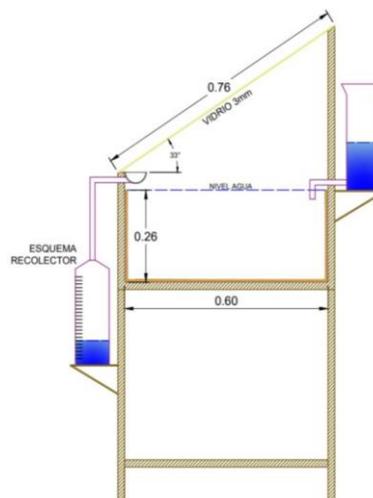


Figura 2. Diseño inicial de prototipo de destilador solar. Fuente: Elaboración Propia.

Además de su funcionalidad y eficiencia, el diseño del destilador solar también se enfocó en la facilidad de mantenimiento y limpieza.

La disposición de los componentes permite un acceso sencillo para inspecciones regulares y labores de mantenimiento, asegurando un funcionamiento óptimo del sistema a lo largo del tiempo y maximizando su vida útil.

El diseño CAD del destilador solar representa una solución innovadora y efectiva para la purificación del agua, especialmente en entornos rurales donde el acceso a agua potable segura es limitado.

Al aprovechar la energía solar de manera eficiente y utilizando tecnologías avanzadas de recolección y almacenamiento, este sistema contribuye significativamente a mejorar la calidad de vida y promover el desarrollo sostenible en comunidades vulnerables.

1.3 Selección de Materiales: Se seleccionaron materiales teóricos adecuados para la construcción del destilador solar, considerando factores de costo, durabilidad y disponibilidad local. También se estimaron los costos de fabricación y montaje.

2. Investigación Preliminar

En esta fase, se enfocó en la investigación y planificación para la futura implementación del prototipo, así como la integración de tecnologías de IoT:

2.1 Identificación de Componentes Hardware.

Se investigaron los componentes necesarios para la implementación del sistema de destilación solar:

Microcontrolador ESP32: Microcontrolador con capacidad de conectividad Wi-Fi y Bluetooth para el control central del sistema.

Sensor de Temperatura: Mide la temperatura del agua y del aire para optimizar el proceso de evaporación.

Sensor de Humedad: Controla los niveles de humedad relativa, importante para el proceso de condensación.

Sensor de pH: Monitorea la acidez o alcalinidad del agua para asegurar su potabilidad.

Sensor de Turbidez: Mide la claridad del agua, detectando partículas en suspensión que pueden afectar la calidad del agua.

Válvulas Controladas Automáticamente: Regulan el flujo de agua en el sistema de destilación.

Filtros UV: Activados para desinfectar el agua después del proceso de destilación.

2.2 Planificación del Software IoT

Se delinearon los requisitos para el desarrollo o adquisición del software necesario para el control y monitoreo del sistema IoT. Este software permitirá la recopilación y análisis de datos en tiempo real.

Desarrollo de software:

Para el desarrollo del software destinado al control y monitoreo del sistema IoT, se utilizó el entorno de desarrollo Arduino IDE, adecuado para programar el microcontrolador ESP32.

Este microcontrolador es esencial para la recolección de datos de los sensores, el procesamiento de estos datos y la implementación de decisiones en tiempo real para ajustar las condiciones del sistema de destilación solar.

Un componente crítico de este sistema de software es la integración de un modelo de regresión logística, que se entrenó utilizando un dataset conocido como "water potability".

Este conjunto de datos abarca una amplia gama de variables relacionadas con la calidad del agua, las cuales son cruciales para evaluar su idoneidad para el consumo humano. Entre estas variables se incluyen los niveles de pH, que indican la acidez o alcalinidad del agua; la turbidez, que mide la claridad del agua y puede indicar la presencia de partículas en suspensión; y la conductividad, que proporciona información sobre la concentración de sales y otros compuestos disueltos. Además, se registra la presencia y concentración de diversos contaminantes, que pueden incluir tanto sustancias químicas como biológicas.

Para analizar estos datos y obtener una evaluación precisa de la calidad del agua, se ha implementado un modelo de regresión logística. Este modelo estadístico avanzado ha sido diseñado específicamente para considerar las múltiples variables mencionadas y sus interacciones, con el fin de predecir la aptitud del agua para el consumo humano.

Mediante el análisis de los patrones y tendencias presentes en los datos, el modelo puede determinar con un alto grado de precisión si el agua cumple con los estándares de calidad necesarios para ser considerada segura para beber.

La implementación de este modelo de regresión logística no solo facilita una evaluación exhaustiva de la calidad del agua, sino que también permite la identificación de posibles riesgos y fuentes de contaminación.

Esto es crucial para la gestión y el tratamiento del agua, ya que proporciona información valiosa para la toma de decisiones y la implementación de medidas correctivas. En resumen, este análisis avanzado de datos es una herramienta fundamental para garantizar la salud pública y la seguridad del suministro de agua potable.

pH	Hardness	Solids	Chloramines	Sulfate	Conductivity	Organic_carb	Trihalometha	Turbidity	Potability
7.3710503	214.496611	25630.32	4.43266929	335.754439	469.914552	12.5091639	62.7972772	2.56029915	0
	227.435048	22305.5674	10.3339179		554.820087	16.3316933	45.3828152	4.13342264	0
6.66021203	168.283747	30944.3636	5.85876913	310.930858	523.671298	17.8842352	77.0421381	3.74970124	0
	215.977859	17107.2242	5.60706045	326.943978	436.256194	14.1890622	59.8554758	5.45925096	0
3.90247569	196.903247	21167.5001	6.99631159		444.478883	16.6090332	90.1816759	4.5285227	0
5.40030178	140.739062	17266.5934	10.0568525	328.358241	472.874073	11.2563812	56.9319065	4.82478639	0
6.51441509	198.767351	21218.7029	8.67093692	323.596349	413.29045	14.8999996	79.8478428	5.20088508	0
3.44506186	207.92626	33424.7687	8.78214748	384.007006	441.785876	13.8059022	30.2845972	4.18439697	0
	145.768181	13224.9356	7.90644472	304.001993	298.990667	12.7295247	49.5368488	4.00487113	0
	266.421018	26362.965	7.70066347	395.38949	364.480107	10.3489508	53.0083814	3.99156425	0
	148.153061	15193.4135	9.04683271	307.011793	563.804743	16.5686556	52.676185	6.03818495	0
7.18144858	209.625601	15196.23	5.99467865	338.336431	342.111286	7.92259833	71.5379533	5.08885999	0
9.82548991	190.756618	19677.8925	6.75754073		452.836235	16.8990378	47.0819712	2.85747243	0
10.433291	117.79123	22326.8921	8.16150481	307.707509	412.986834	12.8907086	65.7334784	5.05731052	0
7.4141482	235.044535	32555.8525	6.84595202	387.175317	411.983364	10.2448151	44.4892973	3.16062447	0
	232.280452	14787.2063	5.47491483		383.981723	12.1669372	86.0807275	5.02916672	0
5.11581706	191.952743	19620.5453	6.060713	323.836384	441.748379	10.9664862	49.2382313	3.90208877	0
3.64162978	183.908722	24752.0725	5.53831413	286.059556	456.860096	9.03406675	73.5946568	3.46435304	0
5.61806441	304.235912	17281.9752	6.10108351		399.471566	12.2650016	81.5889925	2.89654694	0

Figura 3. archivo water_potability.csv Fuente: dataset water probability.

El modelo implementa un proceso innovador al utilizar una matriz de confusión generada a partir de un conjunto de datos específico para clasificar las condiciones del agua como 'apta' o 'no apta'.

Esta matriz de confusión, alimentada por datos recopilados y analizados previamente, se convierte en una herramienta esencial para la toma de decisiones dentro de un sistema de Internet de las cosas (IoT) dedicado al monitoreo y purificación del agua.

La utilidad de esta clasificación radica en su capacidad para informar al sistema IoT en tiempo real sobre la calidad del agua, permitiendo así la adopción de decisiones informadas y ágiles con respecto a los procesos de purificación. Por ejemplo, si el modelo clasifica las condiciones del agua como 'no aptas', el sistema puede activar automáticamente los protocolos de purificación necesarios para garantizar la seguridad del suministro de agua potable.

De manera similar, si las condiciones del agua se clasifican como 'apta', el sistema puede evitar procesos innecesarios de purificación, lo que resulta en una optimización notable de los recursos utilizados.

Esta integración del modelo de clasificación basado en la matriz de confusión no solo aumenta la eficiencia del sistema IoT en términos de respuesta a condiciones cambiantes del agua, sino que también conduce a una gestión más inteligente y sostenible de los recursos.

Al evitar el tratamiento innecesario de agua que ya cumple con los estándares de calidad requeridos, se reduce significativamente el consumo de energía y productos químicos utilizados en los procesos de purificación, lo que a su vez tiene un impacto positivo en los costos operativos y en el medio ambiente.

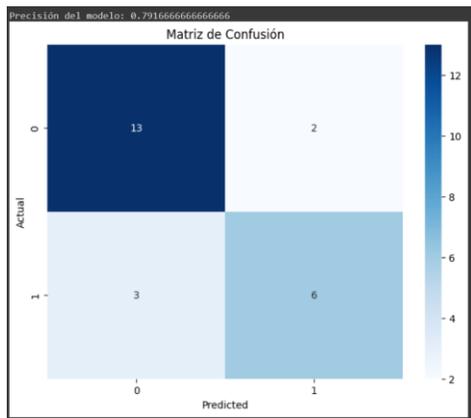


Figura 4. matriz de confusión utilizando regresión logística Fuente: Elaboración Propia.

Desarrollo del Proyecto de Destilación Solar en Home Assistant

Implementación en Home Assistant:

Utilizando Home Assistant, se configuró un sistema para monitorear la temperatura ambiente y la humedad en tiempo real con el sensor DHT11.

Se definieron las variables de pH y turbidez de manera estática.

Definición y Programación de Variables:

Variables Estáticas:

- **pH y Turbidez:** Definidas estáticamente debido a la falta de sensores específicos, con la posibilidad de integración futura.

Variables en Tiempo Real:

- **Humedad y Temperatura:** Monitoreadas en tiempo real con el sensor DHT11.

Configuración de Parámetros de Encendido y Apagado de los Sistemas de Sistema:

- Se establecieron los parámetros de control en Home Assistant basados en las lecturas de temperatura, humedad, pH y turbidez.
- La lógica de control asegura la operación eficiente y segura de los sistemas de encendido y apagado del sistema.

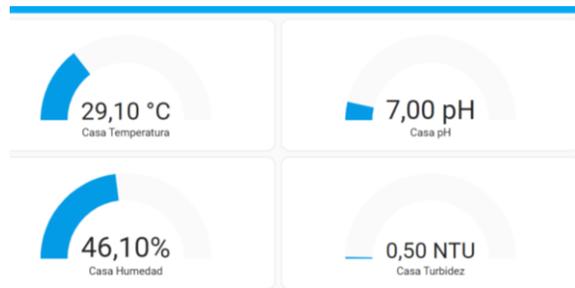


Figura 5. Monitoreo de Variables en Home Assistant Fuente: Elaboración Propia.

Código en IDE de Arduino.

El programa fue diseñado para monitorear y controlar el sistema de destilación solar, midiendo parámetros como temperatura, humedad, pH y turbidez, y controlando los sistemas de resistencia.

Estructura del Código:

- Declaración y Configuración:
- Incluye la biblioteca DHT.h para el sensor DHT11.
- Define pines y variables, inicializa la comunicación serial y configura pines de sensores y resistencia.

```
sketch_juntcino
67 Serial.println(" ");
68 Serial.println("pH: ");
69 Serial.println(ph_value);
70 Serial.println("Turbidez: ");
71 Serial.println(turbidity_value);
72
73 // Publicar valores a través de MQTT
74 client.publish(temperature_topic, String(temperature).c_str());
75 client.publish(humidity_topic, String(humidity).c_str());
76 client.publish(ph_topic, String(ph_value).c_str());
77 client.publish(turbidity_topic, String(turbidity_value).c_str());
78
Output Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'Heltec WiFi LoRa 32(V3) / Wireless shell(V3) / Wireless stick lite (V3)' on 'COM5')
Turbidez: 0.50
Temperatura: 29.00 grados Celsius
Humedad: 45.80%
pH: 7.00
Turbidez: 0.50
Temperatura: 29.00 grados Celsius
Humedad: 45.80%
pH: 7.00
Turbidez: 0.50
Temperatura: 29.00 grados Celsius
Humedad: 45.70%
pH: 7.00
Turbidez: 0.50
Temperatura: 29.00 grados Celsius
Humedad: 45.60%
pH: 7.00
Turbidez: 0.50
Temperatura: 29.00 grados Celsius
Humedad: 45.30%
pH: 7.00
Turbidez: 0.50
Temperatura: 28.90 grados Celsius
Humedad: 45.20%
pH: 7.00
Turbidez: 0.50
```

Figura 6. Código arduino y visualización de variables en monitor serial. Elaboración Propia.

2.3 Evaluación de Prototipos Análogos

Se estudiaron prototipos y sistemas de destilación solar ya existentes, el proyecto comenzó con un exhaustivo estudio de los prototipos y sistemas de destilación solar previamente desarrollados y aplicados en diversas áreas. Este análisis profundo no solo buscaba comprender las tecnologías existentes, sino también identificar las metodologías más adecuadas para abordar los desafíos específicos relacionados con la purificación del agua en zonas rurales.

Se examinaron aspectos como la eficiencia energética, la escalabilidad, la durabilidad y la facilidad de mantenimiento para determinar las mejores prácticas a seguir en el diseño e implementación del sistema.

Además, como parte integral del proyecto, se implementó un sistema de Internet de las cosas (IoT)

para el monitoreo continuo de la calidad del agua purificada. Este sistema IoT despliega una red de sensores

estratégicamente ubicados en diferentes puntos del proceso de purificación.

Estos sensores recopilan datos en tiempo real sobre diversos parámetros, como la temperatura, el pH, la turbidez y la concentración de contaminantes, proporcionando así una visión completa y detallada del estado del agua en cada etapa del proceso.

La integración del sistema IoT desempeña un papel crucial en el aseguramiento de la calidad del agua tratada, ya que permite una supervisión constante y precisa de los estándares de potabilidad establecidos por las normativas locales.

Cualquier desviación de estos estándares se detecta de inmediato, lo que activa alertas automáticas y protocolos de corrección para garantizar que el agua purificada cumpla con los requisitos de seguridad y salud pública.

Este enfoque integrado, que combina la investigación exhaustiva de tecnologías existentes con la implementación de soluciones IoT avanzadas, garantiza que el proceso de purificación del agua sea eficiente, efectivo y confiable.

Además, al mejorar el acceso a agua potable segura en las zonas rurales de Popayán, este proyecto no solo tiene un impacto inmediato en la salud y el bienestar de la población local, sino que también contribuye significativamente a la promoción del desarrollo sostenible y la equidad social en la región.

4. Resultados

4.1 Diseño CAD

El diseño del destilador solar se desarrolló utilizando software de Diseño Asistido por Computadora (CAD), específicamente SOLIDWORKS, para asegurar la precisión y funcionalidad de la estructura. El diseño CAD del destilador solar incluye todos los componentes clave, tales como el marco de aluminio, la cubierta transparente de vidrio templado, la superficie absorbente de metal pintado de negro, y los sistemas de evaporación y condensación.

El diseño CAD permite visualizar y optimizar la disposición de los componentes, garantizando que la estructura sea robusta, eficiente y fácil de mantener. Además, la simulación en CAD facilita la identificación de posibles problemas y ajustes necesarios antes de la construcción física del prototipo.

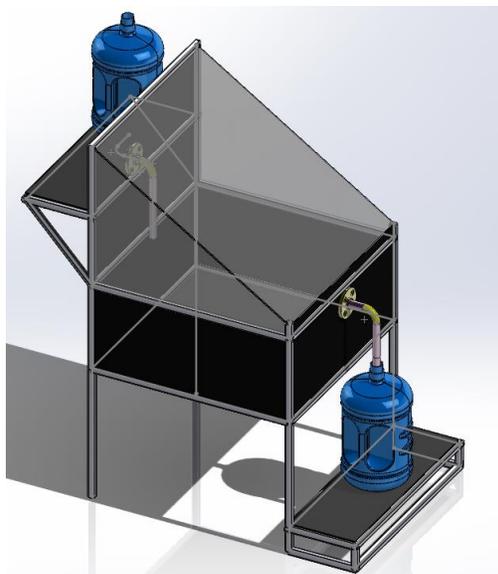


Figura 7. Diseño CAD/CAM del destilador solar elaborado en SOLIDWORKS Fuente: Elaboración Propia.

4.2 Implementación del Modelo de Regresión Logística

Para garantizar la potabilidad del agua destilada, se implementó un modelo de regresión logística utilizando el dataset "water potability". Este modelo se entrenó para predecir si el agua es apta o no apta para el consumo humano basándose en parámetros como pH, turbidez y conductividad.

El proceso de desarrollo incluyó los siguientes pasos:

Preprocesamiento de Datos:

- Limpieza y normalización de los datos del dataset.
- Selección de características relevantes para la predicción de la potabilidad del agua.

Entrenamiento del Modelo:

- División del dataset en conjuntos de entrenamiento y prueba.
- Entrenamiento del modelo utilizando técnicas de validación cruzada para asegurar su robustez.

Evaluación del Modelo:

Uso de una matriz de confusión para evaluar la precisión, sensibilidad y especificidad del modelo.

Ajustes y optimización del modelo para mejorar su desempeño.

La matriz de confusión mostró una alta precisión en la clasificación del agua como apta o no apta para el consumo, lo que indica que el modelo de regresión logística es confiable para su integración en el sistema de IoT del destilador solar.

4.3 Integración y Monitoreo en Home Assistant.

Monitoreo en Tiempo Real:

Utilizando el sensor DHT11, se logró monitorear la temperatura y humedad en tiempo real, proporcionando datos precisos para el control del sistema.

Aunque las variables pH y turbidez fueron definidas estáticamente, la integración futura de sensores específicos está prevista para mejorar la precisión del sistema.

Configuración y Control de Sistemas de Resistencia:

Los parámetros de encendido y apagado de las resistencias se configuraron exitosamente en Home Assistant, asegurando una operación eficiente y segura.

La lógica de control implementada garantiza una respuesta adecuada a las condiciones ambientales, optimizando la eficiencia operativa.

Análisis del Código de Arduino

Funcionamiento Efectivo:

El código de Arduino, diseñado para el monitoreo y control del sistema, demostró ser efectivo en la operación autónoma del sistema.

A lo largo del desarrollo, se realizaron optimizaciones para mejorar la robustez y fiabilidad del sistema.

El software IoT desarrollado incluyó funcionalidades de:

- **Monitoreo Remoto:** Visualización en tiempo real de los datos de los sensores a través de una interfaz web o aplicación móvil.
- **Control Automatizado:** Ajuste automático de los parámetros del destilador, como la apertura de válvulas y la activación del filtro UV, basándose en los datos del modelo de regresión logística.
- **Alertas y Notificaciones:** Envío de alertas en caso de fallos del sistema o cambios críticos en la calidad del agua.

5. Conclusiones

El diseño asistido por computadora (CAD) permitió desarrollar una estructura detallada y optimizada del destilador solar, adaptada a las condiciones locales de Popayán. Aunque no se construyó un prototipo real, las simulaciones y modelados realizados indican que el diseño cumple con los requisitos de eficiencia y funcionalidad necesarios para operar de manera efectiva en un entorno rural.

La implementación teórica del modelo de regresión logística mostró que es posible predecir con alta precisión la potabilidad del agua. Utilizando un dataset específico de "water potability," el modelo demostró ser capaz de clasificar adecuadamente el agua como apta o no apta para el consumo humano. Esta capacidad de análisis estadístico es crucial para futuros desarrollos del proyecto.

La integración de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) en el diseño del sistema de destilación solar demostró su viabilidad. Los sensores y actuadores propuestos, gestionados por un microcontrolador ESP32, proporcionarán datos en tiempo real sobre parámetros críticos como temperatura, pH y turbidez del agua. Este monitoreo y control remoto es esencial para garantizar un funcionamiento eficiente y continuo del sistema.

El análisis teórico del destilador solar sugiere que su implementación mejoraría significativamente el acceso a agua potable segura en las zonas rurales de Popayán. Al utilizar energía solar, el sistema propuesto puede purificar el agua de manera sostenible, reduciendo la incidencia de enfermedades transmitidas por el agua y mejorando la calidad de vida de las comunidades rurales.

Recomendaciones para la Implementación Futura:

Para avanzar hacia la implementación práctica del sistema, se recomienda construir y probar un prototipo real del destilador solar. Esto permitirá validar las simulaciones y ajustes necesarios basados en observaciones empíricas. Además, la colaboración con comunidades locales y la obtención de financiamiento y apoyo técnico serán cruciales para el éxito del proyecto.

6. Referencias

- [1] *Unesco. (2023). Alianzas y cooperación por el agua Resumen ejecutivo.*
- [2] *IDEAM. (2014). Oferta de Agua. <http://www.ideam.gov.co/web/siac/ofertaagua#:~:text=Colombia%20se%20clasifica%20como%20uno,l%2F%2Dkm2>.*
- [3] *OPS (Organización Panamericana de la Salud). (2022). Agua y Saneamiento. <https://www.paho.org/es/temas/agua-saneamiento>*
- [4] *Condorchem Enviro Solutions. (2023). Breve historia de las tecnologías de destilación. <https://condorchem.com/es/blog/breve-historia-de-las-tecnologias-de-destilacion/>*
- [5] *Suarez Trujillo Armando. (2011). OPTIMIZACIÓN UN SISTEMA DE DESTILACIÓN SOLAR DE AGUA BASADO EN HUMIDIFICACIÓN-DEHUMIDIFICACIÓN DE AIRE MEDIANTE SIMULACIÓN DINÁMICA EN TRNSYS.*
- [6] *Rodríguez Molano, J. I. (2017). Metamodelo para la integración de la Internet de las cosas y redes sociales.*
- [7] *Rodriguez Quenoran, J., & Chachinoy Chachinoy, R. A. (2022). Sistema de monitoreo de variables en las etapas de ovas y alevinos en la producción de trucha utilizando una red de sensores y tecnologías IoT.*
- [8] *Comunicaciones Acueducto y Alcantarillado de Popayán. (2022, May 5). Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P. Mejoramiento Continuo, Garantizando La Prestación Eficiente y Eficaz de Los Servicios Públicos de Acueducto y Alcantarillado. <https://aapsa.com.co/empresa-acueducto-y-alcantarillado-de-popayan-s-a-e-s-p-cumple-con-sus-indicadores-de-calidad-del-servicio-en-el-municipio-de-popayan>*
- [9] *Jesús Alba, J., Ortega, J. L., Álvarez, G., Cervantes, M., Ruiz, E., Urtiz, N., & Martínez, A. (2013). Riesgos microbiológicos en agua de bebida: una revisión clínica. *Química Viva*, 12(3), 215-233.*
- [10] *Flores-Valencia, M. A. (2021). Análisis numérico de un destilador solar tipo caseta.*