



AUTOMATIZACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA CAPTACIÓN Y PREDICCIÓN DE LAS PRECIPITACIONES, PARA UNA VIVIENDA URBANA UNIFAMILIAR EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ

José Daniel Corredor Zambrano, James Eduardo Sabala Ríos

**Fundación Universidad Autónoma de Colombia
Bogotá, Colombia**

Resumen

Colombia está ubicada en una región de alta precipitación, la cantidad de lluvia promedio en su territorio es de 3240mm por año. En su capital Bogotá, diversas investigaciones han revelado el consumo y costos derivados del uso del líquido vital en las viviendas, por esta razón varios sistemas de captación de agua lluvia han sido llevados a cabo en esta ciudad, cuya principal característica es netamente la recolección del líquido. Por medio de un control automatizado se plantea además de realizar el monitoreo al sistema en general, la realización de un registro de los niveles de almacenamiento del mismo y adicionalmente, esté en la capacidad de en base a lecturas de algunas variables meteorológicas predecir el comportamiento del clima en corto plazo, y con lo anterior tomar decisiones para la configuración del sistema. Inicialmente el control ha facilitado la gestión del sistema, las predicciones poseen un pronóstico considerable, la implementación de ambas técnicas se realiza en un sistema embebido. Para futuros trabajos se tiene contemplado la optimización del sistema en base al consumo específico de cada vivienda, relacionándose con los niveles de ocupación de almacenamiento y previsión del clima.

Palabras clave: precipitación; predicción; control; gestión del sistema; inteligencia artificial.

Abstract

Colombia is situated in a high precipitation region, the average rainfall on this territory is about 3240mm per year. In its capital Bogotá, a few researches have revealed the demand and derivate

costs of the liquid usage in a dwelling, in consequence several rainwater harvesting systems has been developed in this city, which mainly characteristic is strictly liquid harvesting. Through an automated control is proposed the general system monitoring, the creation of water storage levels registries, moreover, the control is able due to the lecture of few meteorological variables make a weather forecast in a short term. Therefore, take decisions of system configuration. Initially the control has eased the system manage, the predictions have a considerable prognostic, the implementations of both techniques is made in an embedded system. For future works, is contemplated the system optimization in base on specific dwelling water usage, relating with the occupation levels in the storage and the weather forecast.

Keywords: precipitation; forecasting; control; system management; artificial intelligence

1. Introducción

Las precipitaciones son fenómenos naturales y meteorológicos, que se presentan con cierta frecuencia en el mundo de acuerdo a factores fluctuantes como la presión atmosférica, la humedad relativa y la temperatura, que varían de acuerdo a la posición geográfica de cada lugar. En Colombia se cuenta con una precipitación promedio de 3240 mm de lluvia al año (Restrepo, 2017; Tariq Khokhar, 2017) por lo que es una de las mayores del mundo, con lo que se presentan diferentes problemas como inundaciones, deslizamientos y colapsos en los sistemas de alcantarillado entre otros, afectando principalmente a las grandes ciudades por el incremento en la cantidad de precipitaciones que se presenta anualmente de acuerdo a los datos presentados la base de datos libres disponibles en (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR., 2020).

Es importante mencionar la situación que se presenta en Bogotá, Colombia, donde los principales problemas que se generan por el aumento mencionado son las inundaciones, deslizamientos de terreno e inconvenientes de salud pública por desborde de aguas contaminadas para las personas que viven en la capital, ya que por la antigüedad y poca tecnificación del sistemas de alcantarillado no permiten el adecuado flujo de las aguas posibilitando grandes inundaciones como las presentadas el pasado 19 de noviembre del 2020 (Mompotes Lemos Andrés, 2020), donde varios sectores de la capital resultaron afectados como lo fueron la carrera 30 con Calle 72, la calle 68 con carrera 24 entre otros. Un aspecto a resaltar radica en el hecho de que el sistema de alcantarillado está habilitado para realizar el drenaje directo del agua lluvia, lo que posibilita el desaprovechamiento del líquido, que puede ser utilizado en las unidades residenciales para actividades que no requieran agua potable; como lavar prendas de uso diario, vehículos, enseres, fachadas y descargar el sanitario entre otras actividades, de modo que no solo se mitigan las inundaciones, sino que permite una reducción considerable del valor a pagar en la factura de acueducto ya que el gasto de agua potable en los hogares es en promedio de 10126,49 litros para diferentes actividades de cómo se puede observar en la Ilustración 1, por ello mediante la captación de las aguas lluvias se pueden generar un aprovechamiento del recurso en las unidades residenciales en las actividades donde no se requiere agua potable (Londoño et al., 2020; Pedraza et al., 2012).



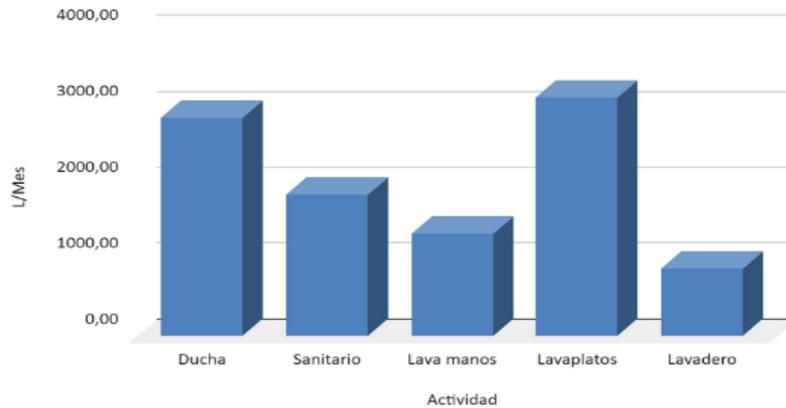


Ilustración 1 Consumo promedio mensual de agua(litros) Fuente: Estudio sobre consumo de agua potable en Bogotá (Londoño et al., 2020)

En el presente proyecto se propone gestionar un cambio que permita darle un aprovechamiento al agua lluvia y su consecuente detención de la escorrentía, para evitar problemas ambientales mayores, como los arriba mencionados, de allí se deriva la urgencia de diseñar un sistema automatizado de recolección de precipitaciones, que permita darle usos alternativos a esta cantidad de agua dentro de las unidades familiares domésticas que no requieran la potabilización del líquido para el consumo humano, sino que sea útil para otra labores del hogar.

El problemática de ahorro de agua no es un tema nuevo por lo que ya se cuenta con diferentes investigaciones en las que proponen diferentes alternativas y usos del agua lluvia como el primero que se le dio hace más de 4.000 años en el desierto de Negev en Israel y Jordania (Suarez et al., 2006) donde se descubrieron algunos de los sistemas, pero, después de la revisión bibliográfica destaca el trabajo hecho por Ramírez (Ramírez-Escobar & Buriticá-Arboleda, 2019) donde presentan un prototipo funcional construido por etapas en sistemas de cascada presentando ahorros de hasta un 26% del agua potable usada en la vivienda.

Para la presente investigación solo se tomaron en cuenta los trabajos realizados en Colombia para así tener en cuenta sobre qué criterios se ha trabajado en las condiciones ambientales existentes y cómo estas investigaciones ayudan a mitigar los resultados del Estudio Nacional de Agua (ENA) donde para el 2025 el 50% las poblaciones Urbanas tendrán desabastecimiento de agua mientras el 80% estarán en alto riesgo (Lozano, 2019)

A partir de la revisión de referentes se ha propuesto un diseño básico de un sistema de recolección de agua lluvia para una vivienda de dos pisos como el de la Ilustración 2 donde se planea aprovechar al máximo la altura en los lugares de almacenamiento, ya que eso ayuda al ahorro energético. Se realiza el debido esquema hidráulico del sistema determinando los diferentes puntos de control garantizando el mejor funcionamiento, sin embargo, no todas las válvulas quedan de fácil acceso al usuario ya que los aspectos más importantes son lo estético al usuario, el ahorro de inversión y la eficiencia energética.



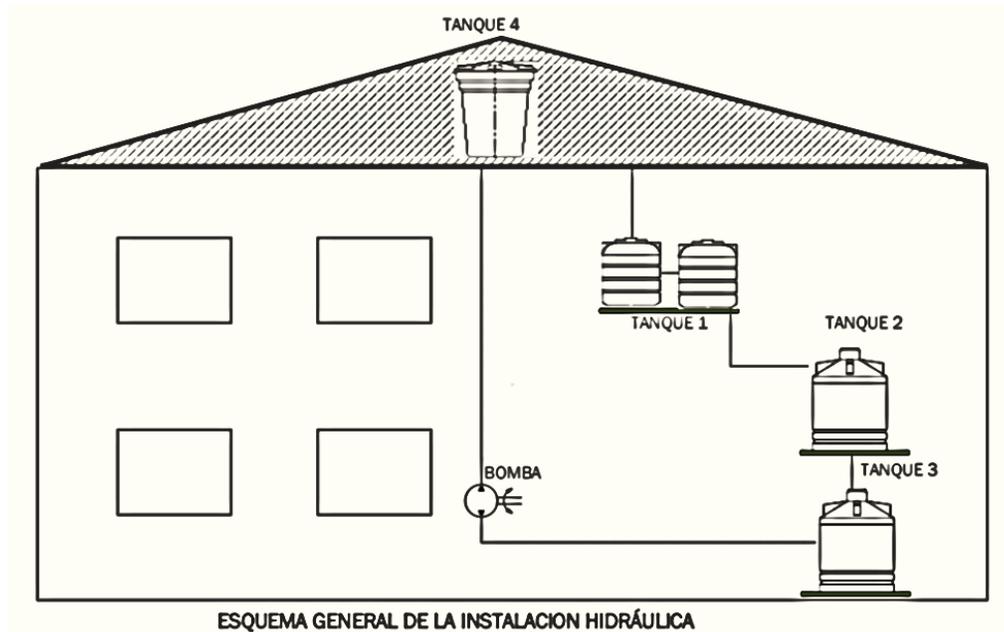


Ilustración 2 Esquema general de recolección de agua lluvia para vivienda de 2 plantas. Fuente: Elaboración Autores

2. Mejoramiento sistema

Debido a la dificultad de llevar a cabo un control sobre los niveles de agua en el sistema por su difícil acceso y riesgos a los que se vería expuesto el operador; Además de carecer de un registro confiable de históricos del sistema. Se propuso la instalación de varios sensores a lo largo del prototipo, sensores de ultrasonido en cada uno de los tanques, sensor de flujo entre el tanque de sedimentación (T1) y los tanques del almacenamiento principales (T2 y T3), asimismo en el sistema se encuentran actuadores electromecánicos, inicialmente electroválvulas cuyo propósito es permitir el flujo y facilitar el almacenamiento de agua en partes específicas del sistema, además de una bomba de $\frac{1}{2}$ HP con una cabeza de 15 metros la cual realiza el abastecimiento del agua al tanque 4, encargado del suministro del agua en la segunda planta de la vivienda.

Por otra parte, para realizar las lecturas de los sensores, la interpretación y la posterior escritura de los valores en un registro organizado para un posterior estudio se implementó una tarjeta de control, un sistema embebido que facilita las operaciones antes mencionadas y también permite el control de los diferentes actuadores antes descritos que hacen parte del sistema. Por su gran versatilidad y facilidad para la realización de tareas a cargo del control del sistema, esta se ha desarrollado en una tarjeta Raspberry Pi, su programación en lenguaje Python, caracterizado por ser de alto nivel y tener una gran comunidad de desarrollo (Upton & Halfacree, 2013).

Partiendo de la toma de valores de los niveles de agua en los tanques, esta medición se determina sea cada cierto tiempo (este tiempo puede ser establecido por el operador), se define un inicial de 10 minutos de intervalo, con la finalidad de no sobrecargar el procesador, por otra parte, los sensores ultrasónicos son comúnmente usados para medición de distancias, en nuestro caso son usados para medir el porcentaje de ocupación de cada tanque, por medio de una razón de cambio



entre el volumen y la altura. Donde la variación de volumen es directamente proporcional a la variación de la altura, partiendo de un área constante, la formula inicial de donde parte la formulación para determinar la ocupación de los tanques puede observarse en la ecuación 1. El intervalo de tiempo anterior mencionado para recopilar los valores actuales de los tanques también influye en la frecuencia de escritura de valores en los registros que realiza el control, estos registros son almacenados en un formato .CSV (Comma Separated Values) por sus siglas en inglés, este archivo puede después ser abierto desde cualquier editor de hojas de cálculo, dentro de este archivo se organizan los valores de cada tanque, con la respectiva fecha y hora de toma de lectura.

Ecuación 1

$$\frac{dV}{dt} = A * \frac{dl}{dt}$$

Donde: "A" es el área, en metros cuadrados, la altura representada por "l" medido en metros, por último, el valor de ocupación del tanque, un volumen, representado por "V" cuya magnitud es de metros cúbicos.

Los actuadores a utilizar en la propuesta son gobernados de igual manera desde el sistema embebido, las señales que son transmitidas a estos elementos son de carácter lógico, representando así solo dos posibles valores 0 y 1 (ON/OFF), para una conexión segura entre control y actuadores se usan optoacopladores, que transmiten la señal mientras proporcionan un aislamiento eléctrico entre ambas partes, luego estos componentes controlan los respectivos relés de cada elemento actuador, la razón principal de usar optoacopladores es que por medio del aislamiento que ellos desarrollan, se evita que corrientes inducidas o reluctantes provenientes del accionar de las bobinas pueda llegar a afectar los puertos GPIO (General Purpose Input Output) de la tarjeta. En la ilustración 3 se puede apreciar de manera sencilla un mapa a grandes rasgos de la relación de los distintos componentes principales del sistema de control.

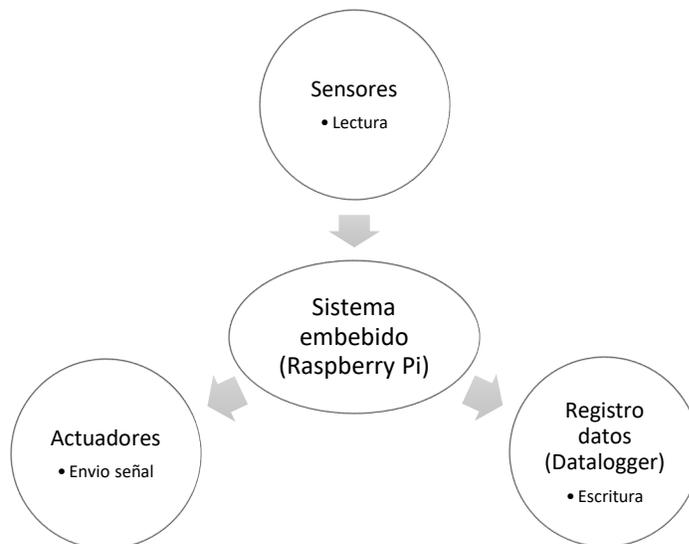


Ilustración 3 Grafica conexiones sistema Fuente: Elaboración Autores



Los componentes del sistema y sus respectivas funciones convergen al desarrollo de un sistema de control básico, donde por medio de la monitorización periódica de las variables que intervienen el sistema, como lo son los niveles de almacenamiento y flujo del agua, la CPU puede determinar la acción a tomar y posteriormente indicarle a los distintos actuadores a lo largo del sistema la configuración necesaria para alcanzar cierto estado y, paralelamente realizar la escritura en un archivo de los registros obtenidos. En la ilustración 4 se puede observar el algoritmo respectivo de este sistema básico de control, donde el punto más sobresaliente es el proceso paralelo entre la comparación de ocupación de tanques y el registro de los valores en el "datalogger", posterior a esto se puede observar que en la toma de decisión de no ser necesaria ninguna modificación al estado actual del sistema este retorna hasta el inicio del algoritmo, donde se encuentra la lectura de datos por parte de los sensores.

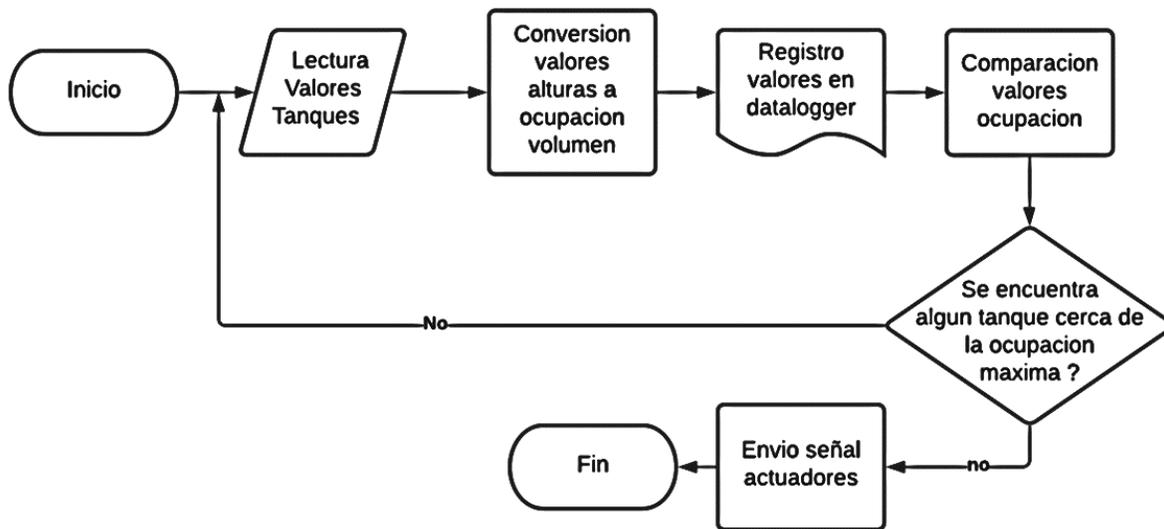


Ilustración 4 Algoritmo de control básico Fuente: Elaboración Autores

3. Implementación Inteligencia Artificial

Como parte de la investigación realizada se realizó una comparación de distintas técnicas de procesamiento de datos, las cuales podían ser alternativas viables a la implementación en el sistema, por características tales como duración de entrenamiento, requerimientos de hardware, predicción y facilidad de implementación. Con puntuaciones obtenidas de las características señaladas de las técnicas preseleccionadas (Lógica Difusa, Regresión Logística y Red Neuronal Artificial tipo multicapa perceptrón) la que más se adapta a las necesidades propias para la implementación al proyecto es la última, RNA. Esta técnica tiene como principal ventaja que sobresale en entrenamientos de sistemas no lineales y que posee la capacidad de aprendizaje en tiempo real (Kingma & Ba, 2015).

La estructura de la red consta de un total de cuatro capas ocultas, cada una de las cuales tiene cuatro neuronas, en la entrada de la red la capa consta de una neurona por variable, alimenta un grupo de tres capas ocultas y directamente se conecta a la concatenación, la cual le sigue la última capa oculta y la salida, para entregar un solo valor, el cual nos indica la probabilidad de llover en



base a los datos en tipo flotante, donde si es positivo indica que hay probabilidad de lluvia, y negativo que no. Inicialmente, del entrenamiento realizado se indica un 98% de exactitud en el comportamiento del sistema, sin embargo, al realizar pruebas más exactas, la precisión descendió a un promedio de 40-60% de aciertos con lo que se sigue trabajando en el mejoramiento de la predicción.

4. Análisis y conclusiones

Inicialmente, se optó por el desarrollo del sistema en el modelo de tarjeta Raspberry Pi Zero W, ya que sus especificaciones cumplen los requerimientos para la realización del control, a esto se suma la posibilidad de poder acceder al registro desde cualquier otro dispositivo conectado a la red doméstica ya que esta placa posee un chip completamente dedicado a la conexión WLAN 2.4GHz 802.11n Wireless, la cual es la más comercialmente usada. Los componentes son de fácil adquisición por lo que se optó por estas referencias en específico debido a su relativo bajo costo y facilidad de implementación, la inversión inicial para la implementación del control al sistema de recolección de agua lluvia ya instalado puede observarse en la tabla 1 donde se muestran los precios de los componentes sin revisar costos de mano de obra.

Cantidad	Elemento	Valor unidad, en COP
4 unidades	Sensor ultrasónico HC-04	7.000
4 unidades	Electroválvulas	30.000
1 unidad	Motobomba ½ HP	150.000
1 unidad	Raspberry Zero W	90.000
100 metros	Cable	110.000
TOTAL		387.000

Tabla 1 Inversión monetaria inicial elementos de control Fuente: Elaboración Autores.

Para un análisis mucho más completo, se determina realizar un seguimiento de todo un año al comportamiento de los niveles de agua en el sistema, los cuales pueden variar de manera considerable entre viviendas por diferentes motivos, por lo que no se puede partir del promedio estándar que existe, con la obtención de este registro también se toma en consideración que a futuro se puede desarrollar una comparativa sólida en términos de mejoramiento energético del sistema, ya que en el mismo prototipo donde se ha venido desarrollando la automatización, anteriormente se llevó a cabo un estudio acerca del impacto de GEI (Gases de Efecto Invernadero) por la producción de agua potable.

El desarrollo e implementación de IA en el sistema se ha realizado mediante de la técnica de redes neuronales, en particular, una red multicapa perceptrón (MLP) por sus siglas en ingles. Una vez entrenada y testeada, fue agregada en el código de control con lo que funciona sin tantos recursos energéticos. En la Ilustración 5 se puede apreciar cómo se desarrolla la ejecución del programa con la implementación de la red neuronal resaltando que durante un ciclo del proceso se guardan datos en dos ocasiones respecto a niveles de almacenamiento, al inicio y al final, esto debe su razón a poder elaborar una comparación y posterior estudio de las variaciones.



La ejecución del algoritmo por parte del sistema embebido es simple, no obstante, se ha podido identificar que, al establecer una frecuencia muy alta en la toma de valores de los niveles, puede generar una sobrecarga al procesador de la tarjeta, adicional a la ya sometida al ejecutar la sección del código de IA, desencadenando en interrupciones del código y recalentamiento de la placa. Por último, la capacidad de conexión a internet de la tarjeta abre la posibilidad a un acceso a los datos de clima ya no exclusivamente a la vivienda donde se encuentra instalado el sistema, sino a la comunidad donde esta se encuentra, además de un envío de valores actualizados de almacenamiento del sistema al usuario final, donde el concepto de control a un sistema de captación de agua lluvia se mezcla con el concepto de Internet de las cosas (IoT) abriéndose así diversas posibilidades de implementación

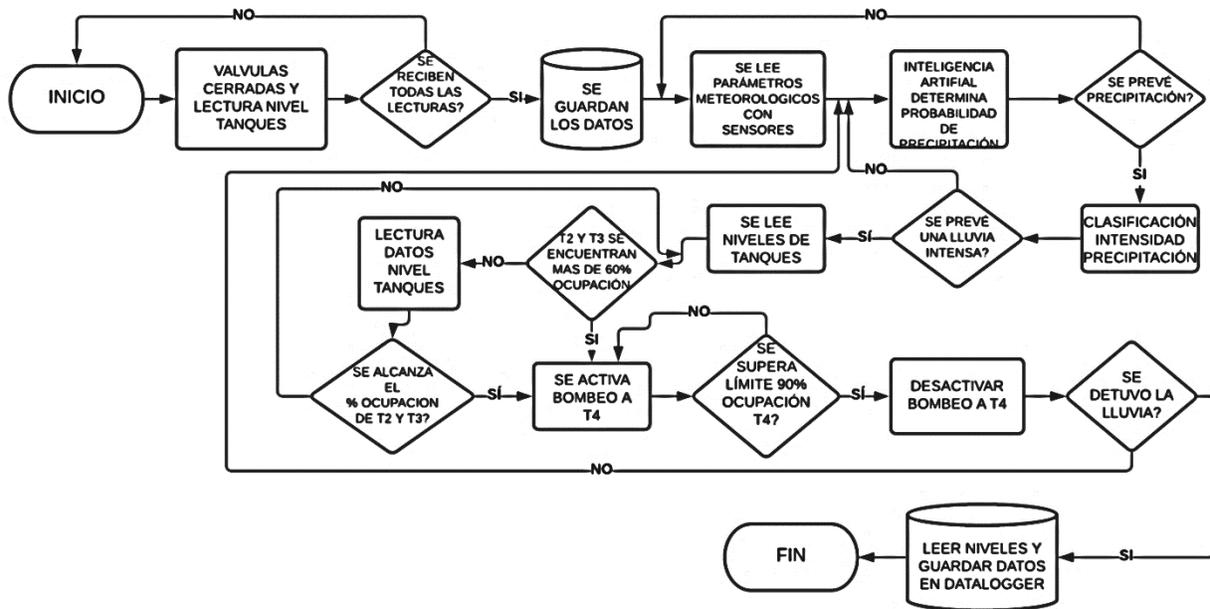


Ilustración 5 Diagrama de flujo control hito II fuente: Elaboración Autores.

Para terminar, con el trabajo realizado sobre las ventajas en la implementación de un sistema de control para la recolección del agua lluvia en una vivienda con 80 metros cuadrados de área de captación, se muestra en la Ilustración 6 los consumos esa vivienda en tres casos: el primero es el consumo normal promedio de 9850 litros en una vivienda estrato 3 como lo dice Londoño (Londoño et al., 2020), el segundo un sistema de recolección de agua lluvia sin control automático y finalmente el sistema de recolección de agua lluvia con la automatización que se propone. Son estimaciones realizadas de acuerdo a los datos obtenidos en las pruebas realizadas, los valores en negativo que se presentan no significan que se aporte agua a la empresa de acueducto, sino que se cuenta con un sobrante que puede ser utilizado en otros propósitos.



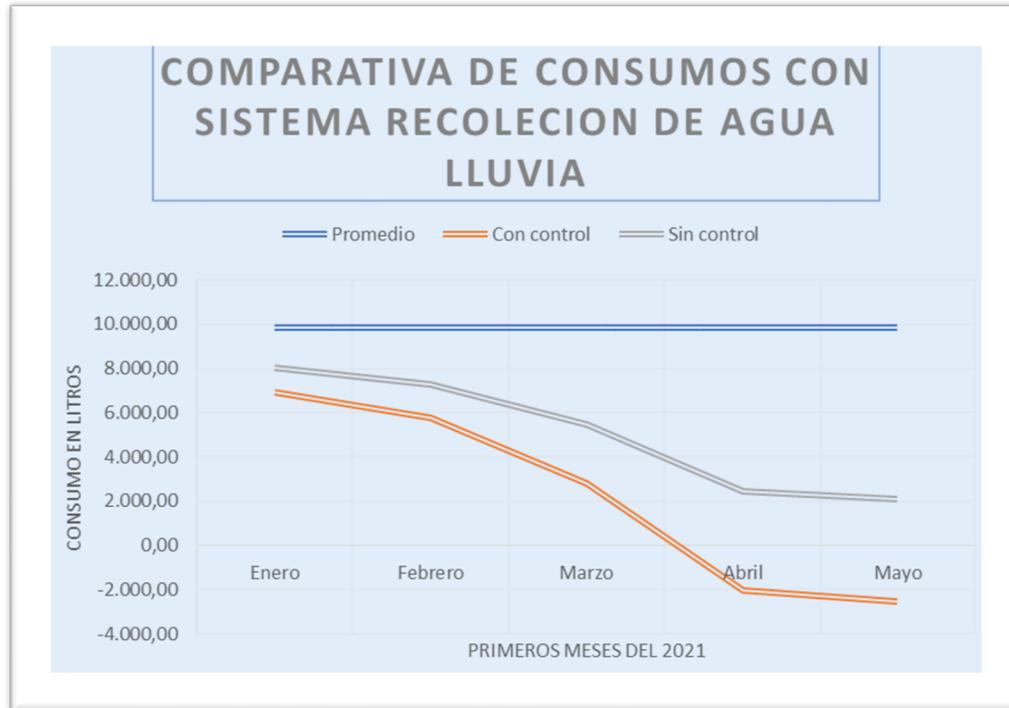


Ilustración 6 Comparativas entre sistema de recolección de agua lluvia con y sin control Fuente: Autores.

5. Agradecimientos

Agradecemos al programa de Ingeniería Electromecánica de la Fundación Universidad Autónoma de Colombia y a su director PhD Luis Alejandro Arias Barragán por ser el principal colaborador y tutor del trabajo realizado

Referencias

- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR. (2020, diciembre 15). *Datos Abiertos Colombia*. GOV.co Datos abiertos. <https://www.datos.gov.co/d/mb4n-6m2g/visualization>
- Kingma, D. P., & Ba, J. L. (2015). Adam: A method for stochastic optimization. *3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015 - Conference Track Proceedings*.
- Londoño, A. M. J., Uran, M. de los A. A., Calderon, V. B., Ossa, A. D. C. D. L., Amorocho, L. M. L., Moreno, C. C. L., Corredor, S. X. M., Ocampo, A. M. P., Molano, M. R., & Rojas, K. S. S. (2020). Consumo de agua potable domiciliar durante el confinamiento por COVID-19, en Bogotá (Colombia). *Biociencias*, 4(1), 1-7.
- Lozano, D. (2019). *Esquema general de intervención para diseño del sistema de recolección de aguas lluvias en una planta de producción ubicada en Cundinamarca*. 9.
- Mompotes Lemos Andrés. (2020, noviembre 19). Fuerte aguacero en Bogotá provoca inundación en varios sectores de la ciudad. En *NOTICIAS EL TIEMPO*. <https://www.youtube.com/watch?v=c1b1MO-aC9w>
- Pedraza, J. E., Barrios, J. G., Cohen, I. S., Villalobos, A. M., & Castorena, M. V. (2012). Análisis de la lluvia y su relación con fenómenos del cambio climático; estudio de caso en estación



- meteorológica Sardinas (San Bernardo, Durango). *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 11(2), 75-84.
- Ramírez-Escobar, C. A., & Buriticá-Arboleda, C. I. (2019). *Prototipo de cosecha inteligente de agua lluvia para mejorar la eficiencia energética residencial en Bogotá Intelligent rainwater harvesting prototype to improve residential energy efficiency in Bogotá*. 25.
 - Restrepo, E. C. (2017, octubre 17). *La razón por la que Colombia es el país más lluvioso del mundo*. [www.elcolombiano.com](https://www.elcolombiano.com/medio-ambiente/pais-del-mundo-donde-mas-llueve-XD7511550). <https://www.elcolombiano.com/medio-ambiente/pais-del-mundo-donde-mas-llueve-XD7511550>
 - Suarez, B., García, M. Á. G., & Mosquera, R. O. O. (2006). Sistemas de aprovechamiento de agua lluvia para vivienda urbana. *Proceedings of the VI Serea-Seminario Iberoamericano Sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua, João Pessoa, Brasil*, 5-7.
 - Tariq Khokhar. (2017, septiembre 15). *Gráfico: ¿Cuáles son los países más lluviosos en el mundo?* <https://blogs.worldbank.org/es/opendata/chart-what-are-worlds-wettest-countries>
 - Upton, E., & Halfacree, G. (2013). *Meet the Raspberry Pi*. Wiley.
-

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2021 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

