

Sistema para aprovechar el agua residual de lavadoras en casas habitación

System to use wastewater from washing machines in residential homes

Paulo Cesar González Hernández¹, Juan Gerardo Mosqueda Ramírez¹, Irving Willihado Reyes Buenfil¹ y Alejandro Pizano Martínez¹

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato [pc.gonzalezhernandez, jg.mosqueda.ramirez, iw.reyes, apizano]@ugto.mx

Resumen

El crecimiento poblacional, la escasez de lluvia, y el aumento en la temperatura del planeta aceleran la sobreexplotación de los acuíferos, afectando drásticamente el abastecimiento continuo de agua potable a la población. El estado de Guanajuato y el país no están exentos de esta problemática de impacto social. Este trabajo presenta cifras oficiales de los niveles de los acuíferos de Guanajuato para revelar la escasez del vital líquido en la región. Se presenta una estimación del consumo de agua en lavadoras y sanitarios, lo cual permite proponer una relación que indica que la totalidad del agua residual de ciclos de lavado en casas habitación puede utilizarse en los sanitarios de estas. De esta manera, es posible reducir importantemente la demanda de agua potable a la red de agua potable del estado para mitigar el desabasto agua potable a la población. Para este fin, se propone un sistema que facilita la reutilización del agua residual de los ciclos de lavado. Este sistema involucrara principios de automatización, sistemas de control, internet de las cosas (IOT), sustentabilidad y redes inteligentes. Los resultados principales del proyecto se materializan en el desarrollo de un prototipo experimental del sistema propuesto, el cual se pretende escalar para su aplicación en casas habitación.

Palabras clave: Aprovechamiento de agua residual de lavadoras, PLC's, IOT, sustentabilidad, redes inteligentes.

Introducción

Durante los últimos años es más frecuente escuchar sobre la escasez de agua a nivel mundial. La expansión de los territorios habitados por el ser humano y utilizados por el sector industrial, así como la creciente demanda del sector agrícola, escasez de lluvia, y aumento en la temperatura global del planeta son factores fundamentales que agudizan este problema de gran impacto social. En México se padece sequía y el futuro no es prometedor [1]. Un resumen ilustrativo proporcionado en el informe de monitor de sequía de CONAGUA se muestra en la Figura 1. Estados como Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Sinaloa, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Nayarit, Jalisco, Aguascalientes, Querétaro, Hidalgo, Puebla, Morelos, Ciudad de México, y Guanajuato, entre otros, son los que presentan mayores problemas de sequía y abastecimiento de agua [2]. Es común ver en los noticieros que en la ciudad de México se ejecutan cortes regionales en el suministro de agua para poder maximizar el abastecimiento de este líquido vital. El estado de Nuevo León experimentó en el año 2022 una de las mayores sequías. En ese mismo año, diez de los municipios del estado de Querétaro reportaban sequía extrema [3]. En este mismo sentido, de acuerdo con el monitor de sequía, a inicios del año 2024 aproximadamente un 60% del territorio del estado de Guanajuato se encontraba en condición de sequía extrema, con la mayoría de sus acuíferos en una fase de sobreexplotación; con niveles de almacenamiento inferiores al 50% y una tendencia a la baja [4]. Por ejemplo, la laguna de Yuriria es considerada un humedal de importancia internacional que almacena y proporciona recurso hídrico en la región, y está registrada como un área de vital importancia para la conservación de las aves y la biodiversidad [5]. Sin embargo, en la actualidad, se encuentra prácticamente seca (Ver Figura 2 [6]).

Debido a la preocupante situación de sequía, altas temperaturas, y escasez de agua, diferentes recomendaciones para el ahorro en el uso de agua a nivel doméstico se han sugerido a nivel nacional [7]. Prácticas recomendadas que destacan son [7]: realizar duchas breves, usar cubetas para lavar el automóvil en lugar de la manguera, evitar desperdiciar el agua fría de la regadera, evitar fugas de agua en la instalación

hidráulica del hogar, recolectar el agua de lluvia, usar la lavadora únicamente con cargas completas y utilizar el agua del enjuague para usos que así lo permitan, etc. Todas estas prácticas son imprescindibles para enfrentar la preocupante situación de escasez en el suministro de agua potable para la realización de actividades indispensables del ser humano. Quizás, en el corto o mediano plazo, estas prácticas recomendadas se vuelvan obligatorias por el impulso de leyes gubernamentales para afrontar la carencia del líquido vital.

Diversas propuestas se han utilizado para recolectar el agua de lluvia utilizando un principio similar, ver por ejemplo [8] y [9]. Esta es una opción viable desde el punto de vista de ahorro de agua y podría imponerse en unidades habitacionales en un futuro cercano. Sin embargo, actualmente, puede visualizarse como un sistema que requiere una inversión económica inicial considerable para volúmenes de almacenamiento requeridos para el abastecimiento del consumo diario de agua de una casa habitación. Por ejemplo, únicamente un recipiente de almacenamiento de calidad adecuada para apenas 2,000 lts tiene un costo de alrededor de 10,000.00 pesos/M.N. Además, esta estrategia depende de los niveles de precipitación pluvial, los cuales, en México, son prometedores únicamente en el periodo de verano y tienen una variabilidad importante año con año.

De acuerdo con [10], una familia capitalina integrada por cuatro personas gasta diariamente alrededor de 1,900 lts de agua. En esta condición, los porcentajes típicos de uso de agua son 40% en sanitario, 32% en ducha, 14% en lavadora, 5% en cocina, y 3% en lavabo. De acuerdo con estos datos, el primer lugar en consumo de agua lo ocupa el sanitario y el tercer lugar la lavadora; con una relación de consumo $14/40 \approx 0.35$. Es decir, el consumo de agua en ciclos de lavado representa un 35% del consumo en descargas asociadas al uso del sanitario. Esta relación se confirma en el análisis presentado en este trabajo utilizando diferentes datos estadísticos, lo cual proporciona validez a resultados obtenidos.

Si bien [7] sugiere utilizar el agua residual de la lavadora, no se establece en algún sentido un sistema que facilite al usuario dicha actividad. La falta de dicho sistema no incentiva al usuario a aprovechar el agua residual de la lavadora. Esta es un área de oportunidad muy importante, dado que, en términos generales, la reutilización del agua residual de la lavadora para abastecer las descargas en el sanitario podría reducir la demanda a la red de suministro de agua potable en aproximadamente un 14%, como se muestra en este artículo. En el mejor conocimiento de los autores, no se ha proporcionado un análisis similar al presentado en este trabajo para justificar el aprovechamiento de dicha área de oportunidad y mitigar el impacto social producido por la falta de abastecimiento continuo de agua potable a nivel regional. En base a los resultados de este análisis, en este trabajo además se propone un sistema que facilita la reutilización del agua residual de los ciclos de lavado para su uso en descargas del sanitario. Este sistema involucrara principios de automatización, sistemas de control, internet de las cosas (IOT), sustentabilidad y redes inteligentes. El resultado principal del proyecto es el desarrollo de un prototipo experimental del sistema propuesto, el cual los autores pretenden escalar en el corto plazo para su implementación en una casa muestra en el estado de Guanajuato.



Figura 1. Monitoreo de sequía en México al 15 abril de 2024 reportado por CONAGUA [2].



Figura 2. Vista de la Laguna de Yuriria al 11 de julio de 2024 [6].

Desarrollo

En esta sección se presenta primeramente la condición general de los acuíferos del estado de Guanajuato. Posteriormente se presenta la estimación del balance de consumo de agua en lavadoras y sanitarios. Estos resultados permiten justificar una propuesta general del sistema para aprovechar el agua residual de lavadoras en casas habitación. La propuesta general se utiliza como base para bosquejar una propuesta para una casa habitación muestra. Finalmente, se describe la automatización y control de la propuesta general.

A. Condición general de los acuíferos en Guanajuato

En Guanajuato se dispone de 20 acuíferos, de los cuales 19 se encuentran en estado de sobreexplotación. Por ejemplo, la cantidad de metros cúbicos almacenados y el porcentaje de almacenamiento de las 5 principales presas del estado se muestra en la Tabla 1 para los años 2022 y 2023 [4], [11]. Por otro lado, de acuerdo con CONAGUA, la precipitación pluvial anual en nuestro país para los últimos 5 años es como se indica en la Tabla 2 [12], [13]. Se puede observar que en el estado de Guanajuato la precipitación oscila predominantemente alrededor de 500 mm. En el año 2021 el temporal de lluvia fue muy bueno, teniéndose una precipitación de 780 mm. Sin embargo, para los años 2022 y 2023 la precipitación se redujo a 480.1 mm y 435.1 mm, respectivamente. Considerando la precipitación correspondiente al año 2023, Guanajuato ocupa el lugar número 12 con respecto al estado de menor precipitación, es decir, Baja California que presenta apenas 147.5 mm. Sin embargo, se encuentra en la posición número 20 con respecto a Tabasco, que es el estado con mayor precipitación en el país (1820.7 mm). En este sentido, podemos establecer que Guanajuato se caracteriza por una precipitación pluvial considerablemente baja. Hacemos notar que la media nacional para el año 2023 fue de 721.7 mm.

Se puede observar de la Tabla 1 que en el año 2022 la cantidad total de metros cúbicos almacenados en las 5 principales presas del estado ascendía a 881.25 millones de metros cúbicos, lo que representaba un porcentaje de almacenamiento promedio de apenas un 51.89 %. Esto a pesar de que la elevada precipitación pluvial (780 mm) del año 2021 permitió que sus niveles de almacenamiento alcanzaran valores cercanos al 100%. Esta situación parece indicar que en el estado de Guanajuato estamos consumiendo agua a un ritmo que no puede ser reestablecido por los niveles predominantes de precipitación pluvial (alrededor de 500 mm). Consecuentemente, esto provocó que al 28 de junio de 2023 las 5 principales presas se encontraran a un nivel marginal del 39.20 % de su capacidad, lo que representaba un almacenamiento de 665.79 millones de metros cúbicos. En este sentido, el escaso temporal de lluvia en el año 2023 (apenas 435.1 mm) y el elevado consumo del recurso hídrico llevaron al nivel de almacenamiento de los acuíferos a un estado crítico en los primeros meses del año 2024 (ver por ejemplo Fig. 2).

Para contrarrestar los efectos de la sequía y el desabasto de agua potable, se ha implementado el conocido sistema de tandeo en las principales ciudades del estado. Debido el bajo valor de la relación de precipitación pluvial a consumo hídrico, se prevé que este sistema de tandeo continúe implementándose. Esto enfatiza la necesidad de implementar nuevas medidas para afrontar la escasez del recurso hídrico en Guanajuato.

En este sentido, el proyecto propone un sistema para facilitar la reutilización del agua residual de los ciclos de lavado. Este sistema involucrará principios de automatización, sistemas de control, internet de las cosas (IOT), sustentabilidad y redes inteligentes. A la fecha, la falta de dicho sistema, aunado al desconocimiento de información concreta como la que se presenta líneas arriba y quizás la falta de reglas gubernamentales, el usuario/propietario de una casa habitación no es incentivado a aprovechar el agua residual de la lavadora.

Tabla 1. Niveles de las 5 principales presas del estado para 2022 y 2023

Nombre de la Presa	Alm 2023 (Mn ³)	Alm 2022 (Mn ³)	Alm 2023 (%)	Alm 2022 (%)
Tepuxtepec	229.48	110.50	59.71	28.75
Solís	314.43	532.77	39.30	66.60
Laguna de Yuriria	50.96	103.07	18.28	36.97
Allende	26.02	66.15	20.80	52.87
La Purísima	44.92	68.78	40.83	62.52
Almacenamiento global	665.79	881.25	39.29	51.89

Tabla 2. Precipitación anual en México a partir del 2019 (últimos 5 años)

Entidad Federativa	Precipitación anual en mm				
	2019	2020	2021	2022	2023
Baja California	206.1	103.5	99.1	123.8	147.5
Baja California Sur	270.6	103	173.5	360.2	187.2
Chihuahua	1767.4	260.8	410.6	472.8	224.5
Coahuila	565.3	227.2	246.5	261.4	242.2
Sonora	648.7	343	502.7	558.1	261.5
Querétaro	411.3	407	648.3	374.6	332.2
Durango	428.8	390.4	469.9	502.3	332.7
Aguascalientes	453.1	498.1	672.3	390	353.5
Zacatecas	460.9	406.3	532.9	364.4	373.9
San Luis Potosí	480.8	446.3	615	430.4	401.9
Hidalgo	438.8	501.5	632.4	447.6	413.2
Guanajuato	553.7	475.5	780.3	480.1	435.1
Nuevo León	499.2	525.5	497.7	400.7	456.8
Ciudad de México	470.3	469.7	637.1	552.8	457.7
Tamaulipas	579.1	631.1	740.2	487.3	535.6
Tlaxcala	564.2	538.4	710	498.8	595.9
Michoacán	829.7	703	974.1	760.8	670.9
Sinaloa	928.2	653.4	952.9	855.8	733.6
Jalisco	926.4	874.2	1106.4	859.3	781.3
Estado de México	837.6	758.9	933.8	849.1	791.6
Yucatán	1034.2	1802.2	1172.6	1154.7	911.3
Oaxaca	1089.4	1125.6	1236.8	1194.4	917.5
Puebla	1040.8	1104.4	1252.5	939.4	932.6
Nayarit	1225.3	1140.5	1393.1	1233.2	1022.1
Guerrero	1102.1	928	1278.2	1170.7	1030.7
Quintana Roo	1036.1	1870.7	1303.7	1292.3	1111.5
Campeche	1303.2	1779.3	1218.7	1423.2	1132.5
Morelos	1691.3	1507.5	1795.1	1333.8	1142.4
Veracruz	1107.6	1548.6	1501.2	1502.9	1269.8
Colima	261.5	1665.1	2280.7	1477.3	1371.4
Chiapas	1816.7	2167.9	1807.2	2054	1701.4
Tabasco	1916	3017.9	1836.1	2451.8	1820.7

B. Estimación de consumo de agua en lavadoras y sanitarios

Para estimar el consumo de agua en lavadoras y sanitarios se recabaron datos mediante una encuesta digital que se aplicó principalmente a estudiantes de la Licenciatura en Ingeniería Eléctrica de la División de Ingenierías de la Universidad de Guanajuato. La portada de la encuesta se muestra en la Figura 3. Los resultados principales obtenidos de la encuesta se ilustran en las Figuras 4 y 5. Con la finalidad de incrementar la base de datos que alimenta este proyecto, se invita a los lectores a participar respondiendo la encuesta a través del código QR que se muestra en la Figura 3 o haciendo clic [aquí](#). Además, para dicha estimación, se obtuvieron cifras de sitios oficiales como son INEGI, PROFECO, y CONAGUA. La estimación se realiza abajo en base a los datos recabados a la fecha de dichas fuentes.



Figura 3. Vista de la Laguna de Yuriria al 11 de julio de 2024.

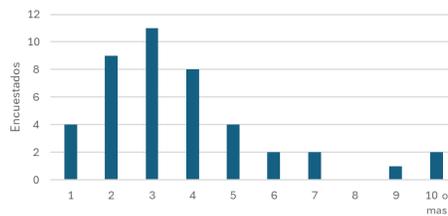


Figura 4. Ciclos de lavado realizados a la semana.

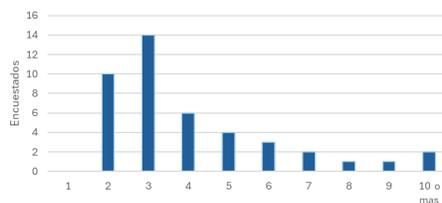


Figura 5. Uso diario del sanitario (inodoro).

La Figura 4 indica que 28 (mayoría) de los 42 encuestados manifiestan que en su hogar se realizan entre 2 y 4 ciclos completos de lavado a la semana. Para fines de este trabajo se considera el promedio, es decir 3 ciclos de lavado a la semana. De manera similar, la Figura 5 ilustra que 30 (mayoría) de los encuestados realizan entre 2 y 4 descargas de agua en el sanitario diariamente. Tal que para el estudio se consideran 3 descargas diarias por individuo.

La estimación del consumo de agua en actividades de lavado es como sigue. PROFECO reporta que, para enero de 2019, las lavadoras menos eficientes, en cuanto a ahorro de agua, consumen alrededor de 332 lts de agua en un ciclo completo, la más eficiente consume 65 lts por ciclo completo [14], como se ilustra en la Figura 6. Para fines de este trabajo de investigación usaremos la referencia de 65 lts por ciclo de lavado. Por otro lado, en el año 2020 el estado de Guanajuato contaba con 1,586,531 viviendas, de las cuales 1,278,744 contaban con una lavadora [15]. Entonces, el consumo de agua a nivel estatal por semana se puede estimar multiplicando el número de lavadoras por 65 lts y por los 3 ciclos de lavado por semana obtenidos de la encuesta aplicada, lo cual da un total de 249,355,080 lts o aproximadamente 250,000 m³. Así mismo, la estimación del consumo anual se consigue multiplicando 250,000 m³ por 52 semanas, lo cual resulta en un total de 13,000,000 m³. Para incrementar la sensibilidad a este resultado, hacemos notar que este consumo anual representa el 26% del agua almacenada en el lago de Yuriria en el año 2023 (ver Tabla 1).

Ahora se presenta la estimación del consumo de agua en el sanitario (inodoro). En el año 2020 el estado de Guanajuato contaba con 6,166,934 habitantes con acceso al servicio de sanitario (WC) [15]. De la Norma Oficial Mexicana NOM-002-CONAGUA-2021, aparatos y accesorios de uso sanitario, se obtiene que en promedio se usan 6 lts de agua limpia por cada descarga del inodoro, la comisión nacional del agua habla de que en promedio un mexicano usa 7 veces al día el inodoro [16],[17]. Sin embargo, para obtener resultados más conservadores, consideraremos el promedio de 3 descargas diarias resultante de la encuesta aplicada. La estimación de este consumo a la semana se obtiene entonces multiplicando 6,166,934 habitantes por 3 descargas diarias, por 6 lts, y por 7 días, lo cual da un estimado de 758,384,802 lts o aproximadamente 759,000 m³. Así mismo, la estimación del consumo anual se consigue multiplicando 759,000 m³ por 52 semanas, lo cual da 39,468,000 m³. Este consumo anual corresponde a aproximadamente el 79% del agua almacenada en el lago de Yuriria en el año 2023 (ver Tabla 1).

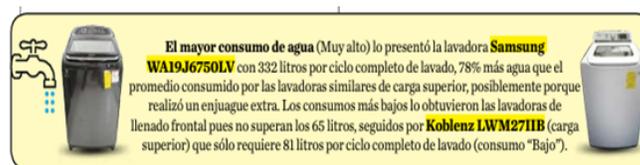


Figura 6 Revista del consumidor enero 2019 [14].

En base a los estimados anteriores, la relación de consumo de agua en ciclos de lavado al de uso de descargas en el inodoro se obtiene dividiendo $13,000,000 \text{ m}^3$ entre $39,468,000 \text{ m}^3$, lo cual da una relación aproximada de 0.33 o 33%. Este resultado es importante por que permite estimar que prácticamente toda el agua desechada de los ciclos de lavado podría utilizarse para abastecer el 33% del consumo de agua del sanitario. En este sentido, el 100% del agua desechada del ciclo de lavado puede reutilizarse para su uso en descargas del sanitario. Consecuentemente, si se aprovecha la totalidad el agua desechada de los ciclos de lavado se podría reducir la demanda de agua potable a la red hidráulica del estado en $13,000,000 \text{ m}^3$, lo que de acuerdo con [10] representaría, en general, una reducción del 14% del consumo total de las viviendas del estado.

Es importante mencionar que la relación de 33% obtenida en este trabajo coincide con la relación de 35% implicada por los datos reportados en [10], como se mencionó en la sección de introducción de este trabajo. En este sentido, se puede aceptar la validez de los resultados obtenidos de los análisis presentados en este proyecto.

C. Sistema general para aprovechar agua residual de lavadoras

Para el desarrollo de este trabajo se planteó un primer acercamiento a lo que sería un sistema automatizado en una casa habitación que cuente con los servicios básicos, también cabe mencionar que el dimensionamiento de los materiales y las potencias requeridas en los equipos eléctricos dependerán del tamaño de cada casa. En este sentido, nos basaremos en un diseño simple como el mostrado en la Figura 7, en el cual nos concentramos en la realización del aprovechamiento del agua residual que se genera en el proceso de lavado para reutilizarla en el inodoro.



Figura 7 Muestra de una casa habitación con servicios básicos.

El sistema general de tuberías de agua de una casa habitación comúnmente interconecta los diferentes elementos de servicio de agua (llaves, baños, cocina, etc.), por lo que utilizar el mismo sistema afectaría el resto de los elementos. En este trabajo se plantea realizar un acople directo con la porción de tubería que conecte solo al inodoro, permitiendo de esta manera disponer de un punto común del cual se pueda extraer el agua residual colectada de los ciclos de lavado o agua potable del sistema hidráulico tradicional de la casa habitación. Para este fin, utilizaremos un tanque de agua secundario y de una cisterna o contenedor. En la cisterna se almacenará directamente el agua desechada de los ciclos de lavado, la cual será bombeada al tanque secundario ubicado en el techo de la casa. De esta manera, el agua de los ciclos de lavado podrá tomarse del tanque secundario para su descarga por gravedad en el sanitario, tal como se puede observar en el esquema ilustrado en la Figura 8.



Figura 8 Esquema general de interconexión de tuberías al inodoro.

Sin embargo, por cuestiones de simplicidad y para únicamente fines de prueba, se ha decidido reutilizar el agua de manera cíclica, ya que se utilizará agua limpia en todo el sistema. En este sentido, para implementar un prototipo experimental, el sistema de la Figura 8 se simplifica al ilustrado en la Figura 9. Se debe tomar en cuenta que la idea principal del prototipo es demostrar el funcionamiento de la automatización para el aprovechamiento del agua residual de los ciclos de lavado.

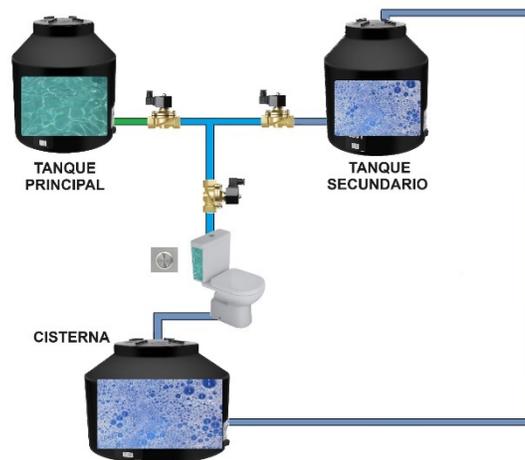


Figura 9 Sistema propuesto para la realización del prototipo.

D. Automatización de sistema general

Para la realización del proceso de automatización del prototipo a desarrollar en este trabajo se adoptó el esquema planteado en la Figura 9. A partir de este sistema se implementó un modelo digital en los softwares de uso libre Cade-simu y PC-simu, como se muestra en la Figura 10. De esta manera fue posible simular digitalmente el proceso de vaciado y llenado de los tanques que componen el sistema, recreando así su funcionamiento y permitiendo identificar las condiciones a cumplir para su automatización. Por consiguiente, se realiza la designación de variables considerando los elementos mínimos requeridos para el cumplimiento del objetivo general del proceso planteado. El listado de los elementos mínimos y la designación de las correspondientes siglas sugeridas por la normativa ANCE, así como los términos mnemotécnicos que permitirán analizar de manera más simple los diferentes estados de los elementos, se proporcionan en la Tabla 3.

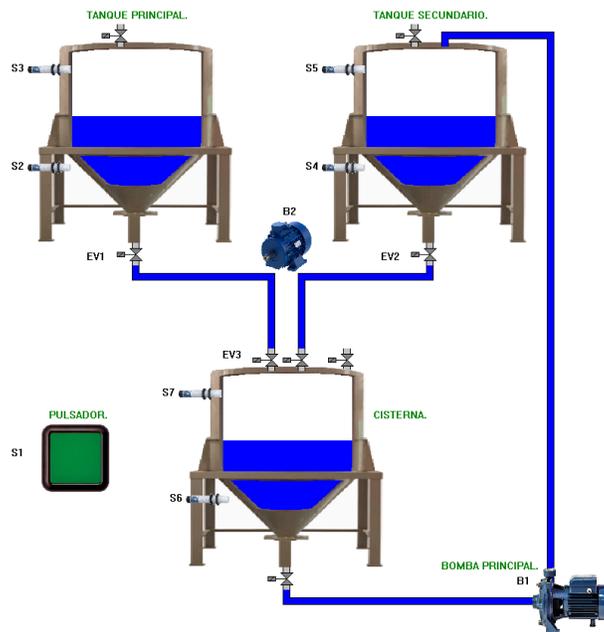


Figura 10 Esquema simulado del prototipo a automatizar.

Tabla 3. Enlistado y designación de siglas de los componentes utilizados en prototipo.

No	Componente	ANCE	VAR
1	Pulsador NA	S1	a
2	Sensor del Tanque Principal Vacío.	S2	b
3	Sensor del Tanque Principal Lleno.	S3	c
4	Sensor del Tanque Secundario Vacío.	S4	d
5	Sensor del Tanque Secundario Lleno.	S5	e
6	Sensor de la Cisterna Vacío.	S6	f
7	Sensor de la Cisterna Lleno.	S7	g
8	Electroválvula del Tanque principal.	EV1	w
9	Electroválvula del Tanque Secundario.	EV2	x
10	Electroválvula de Descarga.	EV3	y
11	Bomba Principal.	B1	z
12	Bomba auxiliar.	B2	y

Una vez determinados los elementos a utilizar para el presente prototipo, se procede con el análisis del objetivo general. Para esto se plantea la forma en como interactuaran dichos elementos con el autómata programable (PLC), determinándose así las variables de entrada y salida, y su interacción a fin de cumplir con el funcionamiento deseado que se ilustra mediante Figura 11. También se define el monitoreo de los sensores de nivel con la finalidad de determinar fallas en ellos y poder reajustar la toma de decisiones del sistema para evitar afectar la utilización del sanitario.

Tomándose en cuenta los diferentes casos y considerando los posibles estados del sistema se obtuvieron las operaciones algebraicas mediante la aplicación de minitérminos, obteniéndose con ello una serie de expresiones matemáticas en términos mnemotécnicos que representan los estados binarios de los diferentes elementos de las señales de entrada al sistema. Por ejemplo, la siguiente ecuación representa todos los casos posibles que harían activar una electroválvula con base a las condiciones definidas previamente en el proceso de automatización,

$$EV1 = a \cdot b \cdot \bar{c} \cdot \bar{d} \cdot \bar{e} \cdot \bar{f} \cdot \bar{g} + a \cdot b \cdot \bar{c} \cdot \bar{d} \cdot \bar{e} \cdot \bar{f} \cdot g + a \cdot b \cdot \bar{c} \cdot \bar{d} \cdot \bar{e} \cdot f \cdot \bar{g} + a \cdot b \cdot \bar{c} \cdot \bar{d} \cdot \bar{e} \cdot f \cdot g + a \cdot b \cdot \bar{c} \cdot \bar{d} \cdot e \cdot \bar{f} \cdot \bar{g} + a \cdot b \cdot \bar{c} \cdot \bar{d} \cdot e \cdot \bar{f} \cdot g + a \cdot b \cdot \bar{c} \cdot \bar{d} \cdot e \cdot f \cdot \bar{g} + a \cdot b \cdot \bar{c} \cdot \bar{d} \cdot e \cdot f \cdot g + a \cdot b \cdot c \cdot \bar{d} \cdot \bar{e} \cdot \bar{f} \cdot \bar{g} + a \cdot b \cdot c \cdot \bar{d} \cdot \bar{e} \cdot \bar{f} \cdot g + a \cdot b \cdot c \cdot \bar{d} \cdot e \cdot \bar{f} \cdot \bar{g} + a \cdot b \cdot c \cdot \bar{d} \cdot e \cdot \bar{f} \cdot g + a \cdot b \cdot c \cdot \bar{d} \cdot e \cdot f \cdot \bar{g} + a \cdot b \cdot c \cdot \bar{d} \cdot e \cdot f \cdot g.$$

Posteriormente, una vez obtenidas las ecuaciones determinadas como minitérminos de las tablas de verdad, se procede con la reducción mediante operaciones en base a las leyes del algebra booleana. Esto proporciona como resultado las ecuaciones finales que describen el funcionamiento automatizado de las electroválvulas y las bombas de agua del prototipo:

$$w \cdot y = a \cdot b \cdot \bar{d} \cdot \bar{x},$$

$$x \cdot y = a \cdot d \cdot \bar{w},$$

$$z = d \cdot \bar{e} \cdot f \cdot g + \bar{d} \cdot \bar{e} \cdot f.$$

Del mismo modo, se obtienen las ecuaciones para el control de fallas en los sensores, consiguiendo así tener un algoritmo simplificado y óptimo para la automatización del prototipo, por lo que se procede con la implementación en código de programación mediante el uso de funciones siguiendo el esquema descrito en la Figura 13. También se realiza su simulación previa a la implementación en físico, y una vez comprobado su funcionamiento se transfiere el código para concluir con la programación del autómatas programable. Una vez finalizada la programación del autómatas y la conexión física de los elementos que componen el sistema, se procede con la realización de las pruebas para verificar su adecuada operación.



Figura 13 Esquema general del código principal en el autómatas programable.

Resultados

Los resultados de los análisis y diseños presentados en este trabajo se materializan en la construcción del prototipo físico experimental que se ilustra en la Figura 14. Este prototipo permite gestionar de manera eficiente el agua recolectada de los ciclos de lavado, utilizando el código programado en el controlador lógico programable, electroválvulas y tanques de almacenamiento. Este prototipo se diseñó con el propósito de visualizar y demostrar el funcionamiento del sistema controlado por el PLC.

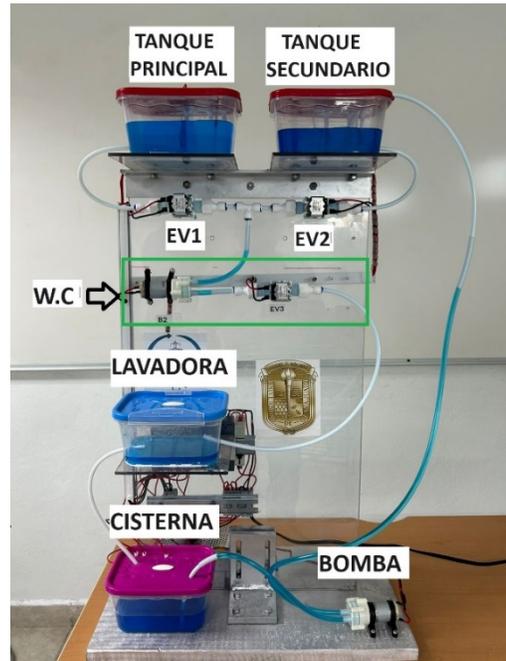


Figura 14 Prototipo del sistema.

El proceso comienza cuando se utiliza la lavadora; el agua empleada durante los ciclos de lavado y enjuague es transportada a través de una tubería hacia una cisterna. Esta cisterna está equipada con sensores que monitorean el nivel de agua en su interior. Una vez almacenada, el agua es elevada mediante una bomba hidráulica hasta un tanque de agua reciclada (tanque secundario). Esta agua reciclada se destina al uso en descargas en el sanitario.

Cuando se acciona la palanca de descarga del sanitario, el PLC evalúa, en base a lecturas de los sensores de nivel instalados en los tanques, si se debe utilizar agua del tanque secundario o del tanque primario (agua potable). Si se detecta agua en el tanque secundario, el PLC activa la electroválvula 2, permitiendo la circulación del agua reciclada hasta el depósito de descarga del sanitario. En caso de que el PLC no detecte agua en el tanque secundario, se abre automáticamente la electroválvula 1 para utilizar agua almacenada en el tanque primario y evitar así la falta de suministro de agua en el sanitario.

Para fines de pruebas y demostración del prototipo desarrollado, el sistema está diseñado para que, el agua proveniente de las electroválvulas 1 y 2 retorne al tanque que representa la lavadora. Esto permite que el ciclo de uso del agua se repita continuamente, mostrando así la eficiencia y efectividad del sistema de gestión de agua implementado.

Debido a que el sistema propuesto permite decidir automáticamente si se consume agua residual de los ciclos de lavado o del agua potable, la instalación hidráulica de una casa habitación se puede visualizar como un sistema hidráulico híbrido inteligente. Es de resaltar que este sistema maximiza la utilización del agua residual de los ciclos de lavado para minimizar el consumo de agua potable. Aunado al almacenamiento y uso del agua residual de los ciclos de lavado, el sistema propuesto se puede extender directamente para incluir un sumidero que permita fácilmente aprovechar el agua residual de labores domésticas que el usuario considere útil para su descarga en el sanitario, en lugar de desecharla directamente al drenaje de la casa habitación. Además, sin modificaciones importantes, el sistema propuesto puede incluir un grifo para que el usuario pueda extraer agua residual para su uso en limpieza de pisos, cocheras, o cualquier otra aplicación pertinente.

Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un análisis de las condiciones recientes de los acuíferos en el estado de Guanajuato. Se realizó una encuesta con el fin de estimar consumo de agua en actividades de lavado y sanitarios en casas habitación. Los resultados obtenidos de la encuesta, combinados con datos estadísticos obtenidos de diferentes fuentes bibliográficas, permitieron estimar de manera cuantitativa que prácticamente el total del agua residual de los ciclos de lavado puede reutilizarse para su consumo en descargas de sanitarios. La aplicación de este tipo de medidas podría mitigar considerablemente la demanda de agua impuesta a las redes de agua potable del estado. Derivado de estos resultados, se diseñó y simuló digitalmente un modelo de sistema que facilita la reutilización del agua residual de los ciclos de lavado para su consumo en sanitarios. Finalmente, el resultado de este proyecto se materializa en el desarrollo de un prototipo experimental del sistema para aprovechar el agua residual de lavadoras en casas habitación.

Como trabajo futuro, los autores de este trabajo pretenden extender el sistema propuesto para aprovechar agua residual de diferentes actividades domésticas. Así mismo, se pretende gestionar apoyo para escalar el prototipo desarrollado para su aplicación en una casa habitación muestra en el estado de Guanajuato.

Referencias

- [1] González, F. (30 de enero de 2024), *México padece sequía y el futuro no es prometedor*. Recuperado de <https://es.wired.com/articulos/mexico-padece-sequia-y-el-futuro-no-es-prometedor#:~:text=La%20Conagua%20calcula%20que%20durante,a%20lo%20registrado%20durante%202022>.
- [2] Rodríguez, J. (23 de abril de 2024), *Mapa de la sequía en México 2024: Más de 50% de los municipios no tienen agua*. Recuperado de <https://politica.expansion.mx/estados/2024/04/23/mapa-sequia-mexico-2024#:~:text=Cuatrocientos%20Coahuila.,Ocampo%20Guanajuato>.
- [3] Partida, J. P. O. (17 de junio de 2021), *Causa de las sequías ¿Cuál es la conexión con el cambio climático?*, Unión de científicos conscientes. Recuperado de <https://es.ucsusa.org/recursos/la-conexion-entre-las-sequias-y-el-cambio-climatico>.
- [4] Gobierno del Estado de Guanajuato (2024), *Promedian principales presas de Guanajuato 49.88 por ciento de almacenamiento*, Boletín gobierno del estado. Recuperado de <https://boletines.guanajuato.gob.mx/2024/01/15/promedian-principales-presas-de-guanajuato-49-88-por-ciento-de-almacenamiento/>.
- [5] Gobierno del Estado de Guanajuato (2005), *Laguna de Yuriria y su Zona de Influencia*. Recuperado de <https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/areas-naturales-protegidas/10/Laguna-de-Yuriria-y-su-Zona-de-Influencia#:~:text=La%20Laguna%20de%20Yuriria%20es.un%20Humedal%20de%20Importancia%20Internacional>.
- [6] Hernández, T. (2021), *Se está secando la Laguna de Yuriria*. Recuperado de <https://www.elsoldeirapuato.com.mx/local/se-esta-secando-la-laguna-de-yuriria-6586240.html>.
- [7] CONAGUA, (21 de marzo de 2015), *Recomendaciones para ahorrar agua*. Recuperado de <https://www.gob.mx/ePN/articulos/recomendaciones-para-ahorrar-agua>.
- [8] López-Hernández, N. A., Palacios-Vélez, O. L., Anaya-Garduño, M., Chávez-Morales, J., Rubiños-Panta, J. E., & García-Carrillo, M. (2017), *Diseño de sistemas de captación del agua de lluvia: alternativa de abastecimiento hídrico*, Revista mexicana de ciencias agrícolas. Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342017000601433.
- [9] López, J. S., González, R. C., & Herrera, J. V. (2016), *Evaluación de un sistema de captación de agua de lluvia en la zona metropolitana de Monterrey, para su aprovechamiento como*

- medio alternativo, Ingeniería. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750927001.pdf>.
- [10] Seguros GMX, (2018), *¿Qué actividades consumen más agua en casa?*. Recuperado de <https://www.gmx.com.mx/blog-gmx/%C2%BFqu%C3%A9-actividades-consumen-m%C3%A1s-agua-en-casa.html#:~:text=En%20promedio%2C%20una%20familia%20capitalina,vez%20que%20abrimos%20una%20llave>.
- [11] Gobierno del Estado de Guanajuato (28 de junio de 2023), *Principales presas del Estado se encuentran al 39.20 por ciento de su capacidad*. Recuperado de <https://boletines.guanajuato.gob.mx/2023/06/28/principales-presas-del-estado-se-encuentran-al-39-20-por-ciento-de-su-capacidad/>.
- [12] CONAGUA, (2023), *Precipitación (mm) por Entidad Federativa y Nacional*. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Luvia/PREC/2023.pdf>.
- [13] CONAGUA, (2022), *Precipitación (mm) por Entidad Federativa y Nacional*. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Luvia/PREC/2022.pdf>.
- [14] Revista del Consumidor (enero de 2019), *Estudio de Calidad en Lavadoras Automáticas*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/426684/ESTUDIO_DE_CALIDAD_LAVADORAS_AUTOMATICAS_.pdf.
- [15] INEGI (2020), *Panorama socioeconómico de Guanajuato 2020*. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197841.pdf.
- [16] SEGOB (29 de noviembre de 2022), *NORMA Oficial Mexicana NOM-002-CONAGUA-2021, Aparatos y accesorios de uso sanitario*. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5672648&fecha=29/11/2022#gsc.tab=0.
- [17] Comisión Nacional del Agua (12 de enero de 2018), *Inodoros sustentables, otra forma de cuidar el agua*. Recuperado de <https://www.gob.mx/conagua/articulos/inodoros-sustentables-otra-forma-de-cuidar-el-agua?idiom=es#:~:text=Una%20persona%20utiliza%20en%20promedio,hasta%2016%20litros%20de%20agua.&text=Inodoros%20sustentables%2C%20otra%20forma%20de%20cuidar%20el%20agua.,hasta%20el%2060%25%20del%20I%C3%ADquido>.