

Diseño y construcción de un prototipo automatizado para desinfectar agua superficial usando ozono y radiación ultravioleta en el aeropuerto de Jaén

Design and construction of an automated prototype to disinfect surface water using ozone and ultraviolet radiation at the Jaen airport

Eduard D. Espinoza E¹ * y Paulo J martines C² 

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue diseñar y construir un prototipo (con un consumo energético de 50 watt) que garantice la desinfección de agua superficial usando la tecnología del ozono y radiación ultravioleta. La selección de los componentes se hizo teniendo en cuenta un caudal de agua a desinfectar máximo de 30 litros por minuto; la inyección de ozono se hizo a través de una válvula Venturi a una presión de 4 bar y la regulación de presión producida por la electrobomba se hizo a través de una llave de control y un manómetro. Para la automatización del prototipo se utilizó sensores de nivel, de flujo, pantalla LCD y un Arduino uno; el diseño de la estructura metálica y de un mezclador estático se hizo con ayuda del software SolidWorks. Las pruebas microbiológicas fueron realizadas por la DISA – Jaén. Se logro desinfectar el 100% del agua que se trató. Finalmente se concluye que 25 watt de radiación ultravioleta y 5g de ozono fue suficiente para desinfectar el caudal de agua utilizado.

Palabras clave: Agua, caudal, desinfección.

ABSTRACT

The objective of this research was to design and build a prototype (with an energy consumption of 50 watts) that guarantees the disinfection of surface water using ozone technology and ultraviolet radiation. The selection of the components was made taking into account a maximum flow rate of water to be disinfected of 30 liters per minute; The ozone injection was made through a Venturi valve at a pressure of 4 bar and the pressure regulation produced by the electric pump was made through a control key and a pressure gauge. For the automation of the prototype, level and flow sensors, LCD screen and an Arduino uno were used; the design of the metallic structure and of a static mixer was done with the help of SolidWorks software. The microbiological tests were carried out by DISA – Jaen. 100% of the water that was treated was disinfected. Finally, it is concluded that 25 watts of ultraviolet radiation and 5g of ozone was enough to disinfect the flow of water used.

Keywords: water, flow, disinfection.

DOI: <https://doi.org/10.37787/pakamuros-unj.v10i1.268>

Recibido: 19/01/2022. Aceptado: 04/03/2022

* Autor para correspondencia

1. Universidad Nacional de Jaén, Perú. Email: eduarddenis25@gmail.com

2. Universidad Nacional de Cajamarca, Perú. Email: pjmcpe1@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El agua es el elemento fundamental para el sostenimiento y la reproducción de la vida en el planeta, sin embargo, para el consumo humano debe pasar por un proceso de purificación y desinfección ya que contiene microorganismos que son dañinos para la salud. Según la Organización Mundial de la Salud el consumo de agua no potable causa enfermedades como la diarrea, cólera, tifus, hepatitis, entre otros. En el mundo las diarreas son la tercera causa de muerte entre menores de cinco años y más de 340 000 niños menores de cinco años mueren por enfermedades diarreicas (Cabezas, 2018).

El 22% de la población del Perú consume agua no potable; por otro lado, los departamentos con menor acceso al agua potabilizada son: Huancavelica, Cajamarca, Pasco, Amazonas y Huánuco. Cajamarca el departamento que presenta una situación crítica respecto al servicio de agua potable cuenta con el 41.7% de la población sin este servicio. Las provincias de Santa Cruz, Cutervo, Chota y Jaén son las provincias con mayor porcentaje de población que no cuentan con agua apta para el consumo humano (INEI, 2018). A pesar que la cloración ha sido el método predominante de desinfección en plantas potabilizadoras de agua, la ozonización y la radiación ultravioleta ha sido ampliamente usada en Francia, Alemania y Canadá.

Con la aparición de los subproductos de la desinfección y efectos adversos del cloro la aplicación del ozono y la radiación ultravioleta (UV) en el tratamiento de agua potable es más eficiente, saludable y lo más importante que no deja residuos de los agentes desinfectantes (Surco & Llamajha, 2015).

Estudios realizados desde el descubrimiento del ozono han demostrado la efectividad del mismo en la desinfección total del agua; aquí hay que destacar el estudio de Smith y Bodkin quienes en 1944 compararon la acción bactericida del ozono y el cloro, demostrando que el tiempo necesario para esterilizar un litro de agua a pH 7 y con bacterias totales de $8 \times 10^7/100\text{ml}$ es de 7.5 minutos con una concentración de ozono de 0.13mg/l, para la misma muestra se utilizó 7.9 mg/l de cloro, es decir 60 veces más que el ozono. Por otro lado, Bringman observó que 0.1mg/l de cloro requiere 4 horas para eliminar 6×10^4 células de E. coli en agua, mientras que 0.1mg/l de ozono sólo requiere 5 segundos (Wang, Shammas, & Hung, 2007).

En base a lo mencionado, el objetivo fue diseñar y construir un prototipo capaz de desinfectar agua aplicando tecnologías derivadas de las propiedades del ozono y radiación ultravioleta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un bosquejo preliminar, ver Figura 1. El funcionamiento del sistema empieza cuando el sensor de nivel de agua, previamente calibrado, pondrá en funcionamiento a la electrobomba y al resto de componentes eléctricos. El agua circulará, alcanzando una presión determinada gracias a la electrobomba, esta presión se podrá ajustar con el manómetro y la válvula de paso, es importante tener una presión adecuada ya que a elevada presión puede romper el esterilizador ultravioleta. El inyector Venturi succionará el ozono generado por el reactor y el mezclador estático homogenizará el gas en el agua.

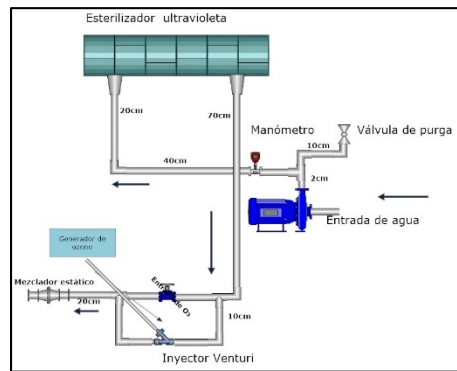


Figura 1. Bosquejo preliminar del prototipo

Cálculo y dimensionamiento hidráulico

El prototipo se ha diseñado con una capacidad para desinfectar 30 litros de agua por minuto, cantidad suficiente para poder mantener abastecido los tanques cisternas del sistema de agua del aeropuerto (Tabla 1).

Tabla 1: Consumo de agua por día en el Aeropuerto de Jaén

	Número de personas	Consumo de agua	
		(litros/día)	Total (litros/día)
Personal	30	20*	600
Pasajeros	394	3**	1182
Cafetería		2880***	2880
Total			4662

*De acuerdo a la OMS cada persona consume 03 litros de agua por día y usa 17 litros para aseo personal.

** Se ha considerado un promedio de 3 litros de agua por pasajero para consumo y aseo personal.

*** El flujo de agua promedio para cafeterías es de 06 litros por minuto operando 8 horas diarias la cantidad de agua que necesita es de 2880 litros/día

La velocidad del fluido se calculó con la ecuación (1).

$$V = \frac{\dot{m}_v}{\pi D^2 / 4} \quad (1)$$

Selección de electrobomba

Conociendo tanto el caudal de agua a tratar y la presión requerida por el inyector Venturi, se procedió a elegir la electrobomba adecuada, no se tomó en cuenta las pérdidas de presión en las tuberías ya que son distancias cortas las que recorrió el agua.

Inyector Venturi.

En la Figura 2 se muestra diferentes tipos de instalación del inyector Venturi, siendo las instalaciones A y B más comunes, en estos casos el inyector fue instalado sobre un punto de restricción como una válvula reguladora o una válvula compuerta/bola para crear un diferencial de presión a través del inyector (Manzano, 2008).

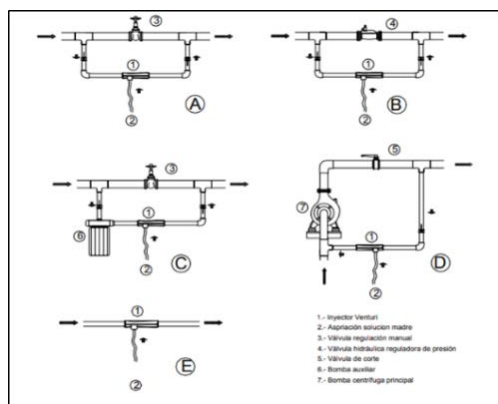


Figura 2. Diferentes formas de instalación de una válvula Venturi.

Fuente: Manzano (2008).

Mezclador estático

Para la selección del tipo de mezclador fue necesario conocer los parámetros de mezclado ya sea turbulento o laminar y para ello se calculó el número de Reynolds, según la ecuación (2) (Cordón Orellana, 2013).

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} \quad (2)$$

Si $Re \leq 2300$ el flujo es laminar, $Re \geq 4000$ el flujo es turbulento, basándose en el valor encontrado el flujo es turbulento, el tipo de mezclador a utilizar es SMV. En función a ello se encontró la longitud del mismo, ecuación (3) (Cordón Orellana, 2013).

$$\frac{L}{D} = \frac{\ln(0,033)}{\ln(Ki)} \quad (3)$$

Selección del generador de ozono

Haciendo uso de la ecuación de Sánchez (2014) se calculó la producción de ozono necesario para desinfectar un caudal de 30 l/m o 1800 l/h de agua, ecuación (4).

$$Pd = Ds(mg/l) \times Q(l/h) \quad (4)$$

Selección del esterilizador de agua por radiación ultravioleta

Para la selección de este componente fue importante calcular la dosificación de radiación ultravioleta con la finalidad de saber si la lámpara ultravioleta logra eliminar los microorganismos más comunes (*Escherichia coli*, coliformes, pseudomonas, virus de la hepatitis, entre otros). En la ecuación (5) se muestra el cálculo de acuerdo a Wright & Cairns (1 998).

$$Dosis\ UV = I_r * T \quad (5)$$

Para calcular el tiempo de contacto de la lámpara se utilizó la ecuación 6 (Wright & Cairns 1 998).

$$A = \pi DL$$

$$I_r = \frac{Potencia}{Área} \quad (6)$$

Diseño de estructura mecánica

El diseño de la estructura mecánica se tuvo en cuenta que cumpla con diferentes condiciones, una de ellas fue tener espacio suficiente para el ensamblado de los componentes, también la estructura debe tener dos compartimientos de tal forma que no se mezcle los circuitos electrónicos con las tuberías de agua. Según la teoría el generador de ozono debe estar refrigerado para su óptimo funcionamiento es por ello que se hicieron agujeros para la entrada y salida de aire como refrigerante. El diseño del prototipo se realizó con ayuda del software SolidWorks (Figura 3).

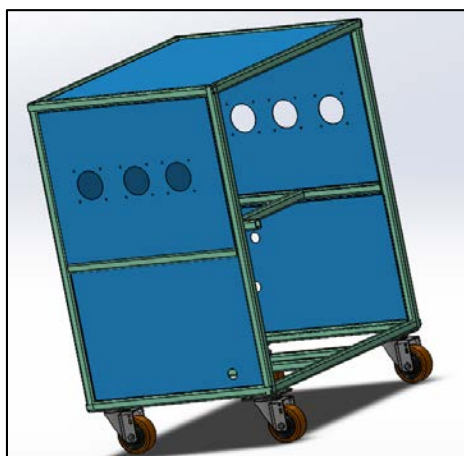


Figura 3: diseño de estructura mecánica.

Construcción del prototipo

Figura 4, muestra la construcción del prototipo esta parte fue fundamental en el desarrollo del proyecto y una de las mayores fuentes de información para analizar la efectividad del ozono y la radiación ultravioleta en la desinfección de agua. Para la construcción se desarrollaron diferentes actividades como la compra de materiales, cortado de chapa metálica, construcción del mezclador estático, pintado del prototipo entre otros.



Figura 4: construcción del prototipo

Pruebas de funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento estuvieron compuestas por cuatro partes:

Prueba 1: Se puso en funcionamiento la electrobomba para probar si hay fugas de agua en las uniones de las tuberías.

Prueba 2: Con la llave de paso instalada se reguló la presión de tal forma que no rompa el tubo de cuarzo del generador de radiación ultravioleta y que la válvula Venturi funcione correctamente.

Prueba 3. Se verificó el funcionamiento de la programación en Arduino. El sensor de flujo instalado permitió controlar la cantidad de agua a tratar que fácilmente se visualiza en la pantalla lcd del prototipo.

Prueba 4: Una vez armado todo el sistema se realizó una revisión general para identificar fallas y corregirlas antes de trasladar el prototipo al Aeropuerto de Jaén.

Prueba 5: se realizó pruebas microbiológicas en el laboratorio de DISA Jaén, con la finalidad de evaluar la calidad de agua que brinda el prototipo desarrollado y hacer ajustes en la instalación del mismo.

RESULTADOS

Tabla 2, se muestra los resultados del cálculo de los valores hidráulicos, el más importante fue el caudal 30 litros por minuto y se tomó para la selección del generador de ozono, esterilizador ultravioleta, electrobomba, diseño del mezclador estático y válvula Venturi.

Tabla 2. valores hidráulicos encontrados

Valor	Descripción	Unidad de medida
Q=30	Caudal	l/m
$m_v = 0,0005$	Flujo másico	m ³ /s
$D_n = 1/2"$	Diámetro nominal de la tubería	In
D= 16,6	Diámetro interior de la tubería	mm
$\rho = 997,13$	Densidad del agua a 25 C°	kg/m ³

Tabla 3, se muestra los requisitos requeridos para el prototipo, compuesta por la electrobomba marca Werken de 0.5 hp de potencia, caudal máximo de 40 litros por minuto, presión máxima de 20 PSI, estos parámetros son los que consideraron para la selección de esta electrobomba.

Tabla 3. características de la electrobomba seleccionada

Características	Electrobomba 1
Marca	Werken
Modelo	Periférica
Peso	5,5 kg
Potencia	0,5 hp
Voltaje	220 v
Presión máxima de trabajo	20 PSI
Altura máxima	15 m
Máxima succión	8 m

Caudal máximo	40 l/m
Garantía	3 años
Precio S/	129

En la Tabla 4 se hace mención a las características del inyector Venturi utilizado, la Venturi 10108 cumplió con el caudal que se necesita en el prototipo que es de 1.8m³/h (30l/m), la presión de trabajo se logra con la bomba seleccionada anteriormente.

Tabla 4. características del inyector Venturi

Características	Venturi 10108
Caudal de entrada (m ³ /h)	0,6 - 2
Caudal succión (l/h)	3 - 37
Presión de trabajo (bar)	0,2 - 4
Diámetro de entrada (in)	½ in
Diámetro de salida (in)	½ in

Figura 5, evidencia la simulación en el software SolidWorks, el color celeste es la entrada de agua con ozono en una corta distancia de 110 milímetros esta mezcla se va homogenizando representado con un color verde, esta simulación garantiza el óptimo funcionamiento del mezclador.

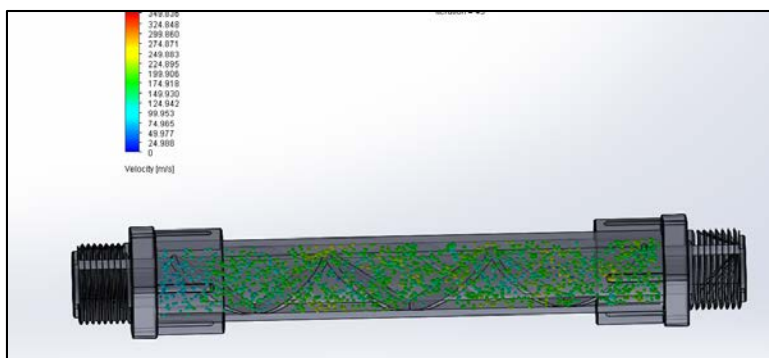


Figura 5. diseño y simulación de mezclador estático en el software SolidWorks

Tabla 5, se describe las características del generador de ozono utilizado en el prototipo, la producción de ozono que se calculó es de 3.6 gO₃/h, pero este valor no se encuentra disponible en el mercado por ello se seleccionó 5 gO₃/h y con 3.6 mg O₃/l de concentración.

Tabla 5. Características del generador de ozono seleccionado

Características	
Voltaje	220 v
Frecuencia	60hz
Potencia	45 w
Flujo de aire	20 l/m
Producción de ozono	5 g O ₃ /h
Concentración de ozono	3,6 mg O ₃ /l
Rango de temperatura de funcionamiento	15 a 40C°
Vida útil	10000 horas

Tabla 6, las características del esterilizador ultravioleta más importantes que cumplen con lo requerido para este prototipo son el tiempo de contacto para esterilizar el caudal de agua de 5.55 segundos, potencia de 25 w y el volumen de radiación de 1.35 l.

Tabla 6. Esterilizador UV seleccionado

Características	Esterilizador UV 1
Marca	Bluekangen
Modelo	QY-UV25W
Material	Acero inoxidable 304
Voltaje	220 v
Frecuencia	50 -60 Hz
Potencia	25w
Rango de presión de funcionamiento	1 - 8 bar
Rango de temperatura de funcionamiento	2 - 40 °C
Volumen de radiación	1,35 l
Diámetro de tubería de entrada y salida de agua	1/2"
Vida útil	8000 h
Precio	600 soles

Figura 6, se detalla los resultados microbiológicos de la primera muestra de agua realizada, se observa que hubo disminución en un 98 % en coliformes termotolerantes y 4% en coliformes totales. Con este resultado el agua no fue apta para el consumo humano, por lo que se optó hacer ajustes en la instalación del prototipo.

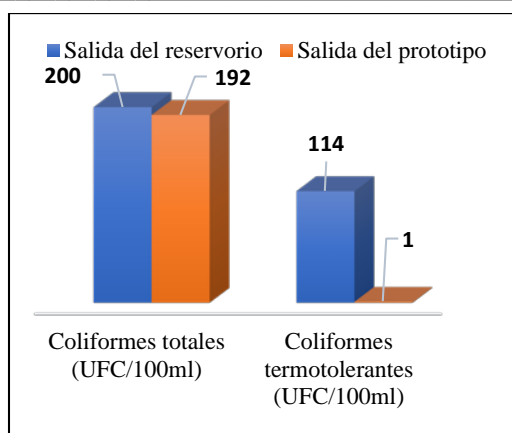


Figura 6. resultados bacteriológicos

Figura 7, se modificó la instalación del prototipo y se observó que se logró desinfectar 95% de coliformes totales y 98 % de coliformes termotolerantes, también se observó un alto índice de turbidez por lo que se realizaron más modificaciones como instalación de filtros y un tanque de floculación.

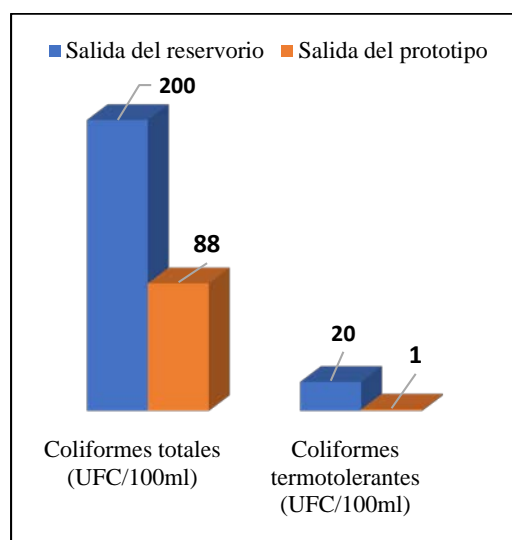


Figura 7. resultados bacteriológicos durante la fase 2

Tabla 7, se detallan los resultados físico químicos, se puede observar disminución en la turbidez de agua mientras que el pH se mantiene dentro de los estándares de calidad de agua para el consumo humano.

Tabla 7. Resultados fisicoquímicos

	Análisis físico químico					
	Salida del reservorio		Salida del floculador		Salida del prototipo	
Olor y sabor			
Temperatura	29,7	°C	29,9	°C	30,4	°C
PH	7,8		7,4		7,4	
Turbidez	38,2	UNT	15,2	UNT	10	UNT

Conductividad	297	us a 20°C	549	us a 20°C	584	us a 20°C
Dureza total	175	mg/l	171	mg/l	168	mg/l
Dureza cálcica	90	mg/l	889	mg/l	89	mg/l
Dureza magnesio	85	mg/l	82	mg/l	79	mg/l
Sólidos disueltos totales	197	ppm	366	ppm	390	ppm
Salinidad	0	%	0,01	%		%

Figura 8, los resultados evidencian que la instalación del prototipo funciona correctamente y se logró desinfectar el agua al 100%.

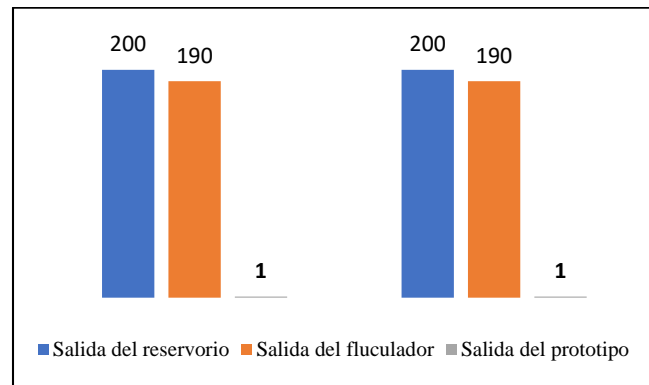


Figura 8. Resultados bacteriológicos de la tercera fase

DISCUSIÓN

Sánchez (2014) construyó un generador de ozono con una producción de 0.97 mg/h y concentración de 0.68mg/l; este prototipo fue probado con diferentes muestras de agua obteniendo resultados favorables tales como una reducción de 75% de coliformes totales. Esta investigación sirvió para modificar el método de inyección de ozono y seleccionar un generador de ozono de los ya existentes en el mercado pues estos nos dan mayor producción de ozono y altas concentraciones del mismo logrando desinfectar el agua al 100%. Al respecto Samayoa (2013) construyó un prototipo que consta de muchas partes móviles las cuales hacen difícil su traslado e instalación. Sin embargo, estos prototipos son benéficos porque aprovecha la radiación ultravioleta para matar vida microbiana y también para generar ozono; esta producción de ozono es en pequeñas cantidades.

El pH de agua osciló entre 7.8-7.4 el cual es aceptable de acuerdo al reglamento de 6.5 a 8.5 reglamento de la calidad de Agua para Consumo Humano: D.S. N° 031-2010-SA. El pH es un importante parámetro en la calidad del agua, dado que si los valores son muy ácidos disuelven los metales empleados en las tuberías, los cuales, al ser ingeridos, afectan negativamente la salud (Pérez-López, 2016).

Los análisis físico químicos y microbiológicos ayudaron a optimizar el prototipo. En la primera muestra se pudo observar que no se logró desinfectar el agua, dado que el prototipo estuvo en fase de desarrollo. Solsona & Méndez (2002) dice que el agua a tratar debe estar con un rango de turbidez a los 10 UNT. En la primera muestra se obtuvo 16 UNT, por lo tanto, se tomaron más muestras de agua y se hizo cambios en la instalación del prototipo. Lopes & Vasconez (2013) incluye en su prototipo un sistema de recirculación de agua para alcanzar mayor concentración de ozono logrando destruir coliformes totales en un 99.86%. En ese sentido es importante los procesos de tratamiento eficientes y confiables para asegurar una calidad del agua que proteja la salud pública, sobre todo dando énfasis en la parte microbiológica (Regnery,2017). En tanto esta investigación para incluir en la instalación el sistema de recirculación se instaló filtros y un tanque floculador posterior y en esta instalación se tomó la última muestra de agua logrando alcanzar los estándares de calidad de agua probando así que el prototipo funciona y puede replicar.

CONCLUSIONES

Al diseñar, construir y hacer pruebas de funcionamiento concluimos que la utilización de 5g/h de ozono y 25w de radiación ultravioleta fue suficiente para desinfectar un caudal de agua mayor a 16 l/m y menor a 30 l/m.

La adición de un tanque de mezclado mejoró la capacidad de desinfección del prototipo, redujo el 94% de coliformes totales y 93% de coliformes termotolerantes. También se apreció reducción en la turbidez del agua en un 50% quedando demostrado otra de las propiedades del ozono.

El equipo diseñado tiene un amplio rango de uso y puede ser utilizado por una empresa purificadora de agua hasta por una familia que lo requiera, gracias a la flexibilidad de instalación.

El bajo consumo de energía del prototipo facilita la instalación con energías renovables en lugares donde no existe una red de servicio eléctrico. Las pruebas físicas y de laboratorio indicaron que el prototipo construido funciona correctamente y que es factible reproducirlo para brindar agua apta para el consumo humano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Beutelspacher, E., & Calderón, J. M. (2005). Diseño y construcción de un generador de ozono para aplicaciones de purificación de agua. (Grado de Maestría). Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, México.
- Cabezas, C. (2018). Enfermedades infecciosas relacionadas con el agua en el Perú. *Revista Peruana De Medicina Experimental Y Salud Publica*. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-4634/2018000200020
- Casero Rodríguez, D. (2008). Potabilización del agua. Escuela de Organización Industrial. Obtenido de <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/20096/potabilizacion-del-agua>
- Cordón Orellana, A. L. (2013). Diseño de un sistema de dilución continua de ácido sulfúrico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Díaz Aburto, H. A. (2016). Modelamiento fluido dinámico de un mezclador estático kenicsestudio de influencia del ángulo de torsión helicoidal en calidad de mezcla. Universidad de Chile, Chile.
- Gordillo, G. E. (2014). Investigación técnica y económica sobre desinfección de aguas residuales por sistemas de oxidación. España.
- INEI. (2018). Formas De Acceso Al Agua y Saneamiento Básico. Obtenido de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/boletin_agua_y_saneamiento.pdf
- López, D. C., & Vásconez, J. P. (2013). Diseño e implementación de un prototipo generador de ozono para purificación de agua para el consumo humano. (Título de Ingeniero en Electrónica y Control). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Lozano Churo, W. J., & Soto Flores, J. F. (2010). Diseño y construcción de un prototipo generador de ozono para la potabilización de agua. Universidad Nacional De Loja, Ecuador.
- Manzano Juárez, J. (2008). Análisis del inyector Venturi y mejora de su instalación en los sistemas de riego localizado. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Merma Surco, A., & Vara Llamojha, K. (2015). Simulación de un proceso de desinfección eficiente de agua a potabilizar, mediante ozono, respetando el ambiente. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa.
- Pérez-López, E. (2016). Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica. *Revista Tecnología en marcha*, 29(3), 3-14.

-
- Rodríguez, T., Botelho, D., & Cleto, E. (2008). Tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta. Brasil.
- Rodríguez Vidal, F. J. (2003). Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización. Madrid: Díaz de Santos.
- Regnery, J., Gerba, CP, Dickenson, ER y Drewes, JE (2017). La importancia de los factores de atenuación clave para los contaminantes microbianos y químicos durante la recarga de acuíferos gestionados: una revisión. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* , 47 (15), 1409-1452.
- Samayoa Gallardo, L. P. (2013). Diseño y construcción de equipo para purificación de agua a bajo costo. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Sánchez, G. O. (2014). Diseño y Construcción de un Sistema de Ozonificación para Purificación de Agua Alimentado con Energía Solar. Instituto Politécnico Nacional, México.
- Solsona, F. M. (2002). JP, Desinfección del agua, cap. 10, 'Desinfección especial y de emergencia'. Lima OPS/OMS-CEPIS.
- Vázquez Zavala, F. (2000). Diseño de un generador de ozono para potabilizar agua.
<https://repositorio.tec.mx/handle/11285/628377>
- Wright, H., & Cairns, W. (1998, October). Desinfección de agua por medio de luz ultravioleta. In Trabajo presentado en los Anales simposio OPS: Calidad de agua, Desinfección efectiva.
- Wang, L. K., Shamma, N. K., & Hung, Y.-T. (2007). *Biosolids Treatment Processes*. New Jersey. Obtenido de https://books.google.com.pe/books?id=Y-A9njTaLpIC&pg=PA274&lpg=PA274&dq=smith+and+bodkin+bactericidal+comparison+of+chlorine+and+ozone&source=bl&ots=8e6_7d9IE9&sig=ACfU3U3RizqEq3nrZBHt_1fU1ZIFrFb1PQ&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwiJn_nO38zlAhUurVkKHQ2LDpsQ6AEw
- Zecua Lechuga, P. D. (2016). Diseño de un mezclador estático que permitirá producir una mezcla de combustibles en el AICM. Universidad Nacional Autónoma de México, México. .