



*Teoría y experiencia con destiladores solares para aguas residuales domésticas.
Caso de estudio – Riobamba*

*Theory and experience with solar stills for domestic wastewater. Case study –
Riobamba*

*Teoria e experiência com alambiques solares para águas residuais domésticas.
Estudo de caso – Riobamba*

José Gerardo León-Chimbolema^I
gerardo.leon@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-9202-8542>

Sofía Carolina Godoy-Ponce^{II}
sofia.godoy@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-6479-4343>

Rogel Alfredo Miguez-Paredes^{III}
rmiguez@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-5063-1474>

Correspondencia: gerardo.leon@esPOCH.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

***Recibido:** 02 de enero de 2022 ***Aceptado:** 20 de enero de 2022 * **Publicado:** 08 de febrero de 2022

- I. Doctor en Química, Docente Investigador, Máster en Protección Ambiental, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.
- II. Ingeniera en Biotecnología Ambiental, Máster Universitario en Gestión Ambiental y Energética en las Organizaciones, Máster en Gestión del Desarrollo Local Comunitario, Docente Investigador, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.
- III. Ingeniero en Sistemas Informáticos, Magíster en Interconectividad de Redes, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.

Resumen

El sol es una fuente de energía constante, abundante, barata y limpia en casi cualquier rincón del planeta, por tanto, es una clara alternativa en los diferentes procesos que demanden potencia o calor para reproducir a nuestro favor el proceso del ciclo natural del agua y más aún como una forma de depuración de aguas con cierto grado de contaminación. De este modo, se hace uso de un recurso natural limitado, "reciclando" aguas ya utilizadas que de otra manera ya no podrían ser usadas y que además serían una fuente de contaminación. En este contexto, el objetivo principal de esta investigación fue diseñar y construir un destilador solar para el tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Riobamba y observar su funcionamiento. En primera instancia, se partió de la identificación de procesos similares en favor de establecer parámetros de diseño adecuados, ecuaciones para obtener valores teóricos y poder implementarlos en la etapa de construcción. Una vez construido el sistema, se inició con la etapa de observación y análisis del funcionamiento mediante pruebas con tres tipos de aguas residuales que suelen ser las más comunes en el medio urbano: doméstica-industrial, doméstica e industrial. Los parámetros más representativos que formaron parte de la evaluación fueron los físicos (turbiedad y color), químicos (demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno) y microbiológicos (coliformes fecales y totales). Para establecer el cumplimiento de estándares normativos se tomaron como referencia los establecidos en la tabla 10 del libro 6 del TULSMA. En términos generales, los resultados demostraron que los destiladores solares son altamente eficientes para el tratamiento de aguas residuales, alcanzando para las aguas residuales industriales-domésticas, domésticas e industriales porcentajes del 89.96%, 94.28% y 99.31% respectivamente en la disminución de contaminantes.

Palabras clave: Ingeniería Ambiental; Destilador Solar; Agua Residual.

Abstract

The sun is a constant, abundant, cheap and clean source of energy in almost any corner of the planet, therefore, it is a clear alternative in the different processes that demand power or heat to reproduce in our favor the process of the natural water cycle and even more as a way of purifying water with a certain level of contamination. In this way, we use a limited natural resource, "recycling" already used water that otherwise could no longer be used and would also be a source of pollution. In this context, the main objective of this research was to design and build a solar still for wastewater treatment in the city of Riobamba and to observe its operation. In the first instance,

we started by identifying similar processes in order to establish adequate design parameters and equations to obtain theoretical values and implement them in the construction stage. Once the system was built, the stage of observation and analysis of its operation began by means of tests with three types of wastewater that are usually the most common in the urban environment: domestic-industrial, domestic and industrial. The most representative parameters included in the evaluation were physical (turbidity and color), chemical (biochemical oxygen demand and chemical oxygen demand) and microbiological (fecal and total coliforms). To establish compliance with regulatory standards, those established in Table 10 of Book 6 of the TULSMA were used as a reference. In general terms, the results showed that the solar stills are highly efficient for wastewater treatment in pollutant reduction for industrial-domestic, domestic and industrial wastewater, achieving percentages of 89.96%, 94.28% and 99.31%, respectively.

Keywords: Environmental Engineering; Solar Distiller; Wastewater.

Resumo

O sol é uma fonte de energia constante, abundante, barata e limpa em quase todos os cantos do planeta, portanto, é uma alternativa clara nos diferentes processos que requerem energia ou calor para reproduzir o processo do ciclo natural da água a nosso favor e ainda mais como forma de purificar a água com um certo grau de contaminação. Desta forma, utiliza-se um recurso natural limitado, "reciclagem" de água já utilizada que de outra forma deixaria de poder ser utilizada e que seria também uma fonte de poluição. Neste contexto, o principal objectivo desta investigação era conceber e construir um alambique solar para tratamento de águas residuais na cidade de Riobamba e observar o seu funcionamento. O primeiro passo foi identificar processos similares a fim de estabelecer parâmetros de concepção adequados, equações para obter valores teóricos e poder implementá-los na fase de construção. Uma vez construído o sistema, a fase de observação e análise do seu funcionamento começou por meio de testes com três tipos de águas residuais que são normalmente as mais comuns no ambiente urbano: domésticas-industriais, domésticas e industriais. Os parâmetros mais representativos que fizeram parte da avaliação foram os físicos (turbidez e cor), químicos (demanda bioquímica de oxigénio e demanda química de oxigénio) e microbiológicos (coliformes fecais e totais). A fim de estabelecer o cumprimento das normas regulamentares, as estabelecidas na Tabela 10 do Livro 6 do TULSMA foram tomadas como referência. Em termos gerais, os resultados mostraram que os alambiques solares são altamente

eficientes no tratamento de águas residuais, na redução de poluentes nas águas residuais industriais-domésticas, domésticas e industriais, atingindo percentagens de 89,96%, 94,28% e 99,31% respectivamente.

Palavras-chave: Engenharia Ambiental; Destilador Solar; Águas Residuais.

Introducción

El agua es un recurso natural que está en constante movimiento, formando parte del Ciclo del Agua o también conocido Ciclo Hidrológico, la característica particular de este proceso es que el agua en todo este recorrido cambia de estado físico, pasando de líquido a gaseoso por medio de la evaporación y luego, nuevamente vuelve a ser líquido por medio de la condensación. Los cambios en la temperatura son los causantes de este fenómeno y en estado natural, la energía requerida para la evaporación es suministrada por el sol y para la condensación, es generada por el viento en la atmósfera. Este ciclo del agua permite que el agua se renueve naturalmente y se auto depure en el proceso, ya que al evaporarse las sustancias minerales y biológicas existentes en el agua permanecen en los sustratos en donde son evaporadas.

Desde un punto de vista de necesidad básica del ser humano, la accesibilidad al agua potable es fundamental en los hogares y la vida diaria de las personas y, sin embargo, acorde a las Naciones Unidas, una sexta parte de la población mundial no tiene acceso a agua potable. Ecuador no es la excepción y es que la Sierra, región que tiene más accesibilidad a este servicio alcanza apenas el 87,4%, regiones como la Costa tan solo llegan al 64,7% y la Amazonía no sobrepasa el 48%. En referente al consumo la OMS considera que para consumo humano (beber, cocinar, higiene personal y limpieza del hogar), la cantidad de agua adecuada es de 50 litros/habitante al día. A esto no se le incluye el agua necesaria para la agricultura, la industria y/o la conservación de los ecosistemas fluviales dependientes del agua dulce. Teniendo en cuenta todo esto, la cantidad mínima sería el doble. A nivel nacional, el consumo promedio de agua por hogar es de 27 m³ al mes, siendo la región Amazónica quien tiene el mayor promedio (39 m³ mensuales) y la Sierra la de menor promedio (23 m³). Es importante mencionar también que nuestro país está en la zona de mayor abundancia de agua a nivel mundial, ya que en esta zona en particular existe el 40% de los recursos de agua del planeta y tan solo el 10% de la población. Esta abundancia a más de ser una gran ventaja ha ocasionado que no visualicemos la escasez como un problema y que, por ejemplo, no asumamos la depuración de las aguas servidas como prioridad, esto también ha ocasionado que

nuestro desarrollo tecnológico en este campo sea limitado, ya que no desarrollamos alternativas de reutilización de las aguas negras y grises.

El problema de contaminación de fuentes hídricas es más grave y común en países en desarrollo, ya que, según la ONU, se arroja más del 90 % de los desechos urbanos sin procesar y el 70 % de los desechos industriales sin tratar a los ríos y a la superficie.

En Ecuador, las aguas residuales domésticas son escasamente tratadas, realmente son pocas las ciudades que realizan algún proceso de depuración, aunque esta sea una de las competencias asignadas a los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) cantonales, parroquiales y que deben ser controladas por el Ministerio del Ambiente. En su mayoría, los sistemas de tratamientos usados en Ecuador son biológicos, como por ejemplo las lagunas de estabilización usadas en la ciudad de Cuenca; otros procesos alternativos utilizan métodos anaeróbicos tales como tanques imhoff y bio-reactores, sin embargo, estos operan mejor con volúmenes de menor cuantía. Uno de los métodos tradicionales más usados para el tratamiento de las aguas negras y grises, presentes principalmente en zonas rurales son los pozos sépticos, no obstante, su aplicación no siempre es efectiva.

No son muchas las experiencias de procesos de destilación de este tipo de aguas a través de sistemas destilación y esto se debe normalmente al aparente gasto energético que suelen suponer, sin embargo, a más de ser fácilmente implementados pueden hacer uso de fuentes alternativas de energía como la solar. Un buen ejemplo de esta metodología sería el caso de Chile, donde se registró el primer destilador en la historia cuya operación lograba abastecer a alrededor de 23000 Litros al día de agua dulce durante 40 años. En esta misma línea, pero en menor escala se tiene el caso de Quito, en donde a través de la Universidad Politécnica Salesiana se diseñó y construyó un destilador solar para agua de una capacidad de 200 mL/día para los laboratorios del CIVABI obteniendo una eficiencia del 35%; el caso de Machala, en donde a través de la Universidad Técnica de Machala se construyó un destilador solar para potabilizar el agua para una familia de 3 a 4 personas obteniendo una producción de 3 L/día; el caso de Sangolquí en la Escuela Politécnica del Ejército donde se diseñó y construyó un destilador solar de aguas residuales para el laboratorio de Energías Renovables-DECEM obteniendo una eficiencia de 22% (2 L/día).

En definitiva, se plantea el presente trabajo como una solución, innovadora en nuestro contexto, de tratamiento de aguas residuales, en el que se describen de manera sintetizada las etapas y variables

que se tomaron en cuenta para obtener el sistema de destilación solar y su posterior puesta en funcionamiento en favor de validar su nivel de eficiencia.

En primera instancia, es importante conocer que el agua residual es la porción líquida formada a partir de los desechos que produce una población después de haberla utilizado para un fin específico (Metcalf & Eddy, 1996), sus características dependen especialmente del origen y el tiempo de retención antes que sean desembocadas, entre las más notables se tiene a las siguientes:

- Características físicas: Color, densidad, olor, sólidos, temperatura y turbiedad.
- Características químicas: Demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y potencial hidrógeno.
- Características biológicas: Microorganismos patógenos.

Estas características pueden entenderse de mejor manera en el siguiente cuadro:

Características Físicas

Cuadro N° 1: Características Físicas del agua

Característica	Descripción
Color	Depende del tiempo de recorrido por el sistema de alcantarillado, pasando de un gris a negro debido a las condiciones anaeróbicas de las tuberías. El agua residual puede mostrar 2 tipos de color: el aparente que es producido por la incorporación de sustancias coloidales o por materiales en suspensión y el color verdadero que es producido al eliminar la turbiedad presente (Castillo & Guerra, 2014).
Conductividad	Es una medida que permite conocer la capacidad de transportar corriente eléctrica, debido a la cantidad de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de su temperatura.
Olor	Es provocado por los gases producto de la descomposición de materia orgánica.
Sólidos	- Los sólidos totales disueltos corresponden a material filtrable compuesto por moléculas orgánicas, inorgánicas e iones en disolución (Metcalf & Eddy, 1996). - Los sólidos totales suspendidos corresponden a material no filtrable obtenido después de un proceso de filtrado (Metcalf & Eddy, 1996).
Turbiedad	Es una medida de transmisión de luz en el agua que se mide a través de la comparación de intensidades de luz dispersada entre muestras y suspensiones de referencia.

Fuente: Autores

Características químicas

Cuadro N° 2: Características Químicas del agua

Característica	Descripción
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	La DBO es un parámetro que demuestra la cantidad de oxígeno disuelto consumido para oxidar o degradar la materia orgánica presente en agua residual. El análisis más utilizado se llama DBO5 ya que se lleva a cabo en 5 días.
Demanda química de oxígeno (DQO)	La DQO es un parámetro que determina la cantidad de oxígeno disuelto consumido por el agua residual durante el proceso de oxidación con ayuda de agentes químicos acelerantes (Metcalf & Eddy, 1996).
Potencial hidrógeno (pH)	El pH es un parámetro que determina el grado de alcalinidad o acidez presente en una sustancia. Un agua residual tratada eficientemente debe tener un pH neutro (6.5 a 8.5 UpH) (Metcalf & Eddy, 1996).

Fuente: Autores

Características biológicas

Los principales microorganismos presentes son:

Cuadro N° 3: Características biológicas del agua

Característica	Descripción
Bacterias	Son microorganismos unicelulares, anaerobios, facultativos o anaerobios, que actúan en los procesos de transformación de materia orgánica (Romero, 2002a).
Hongos	Son microorganismos eucarióticos que descomponen y degradan el carbono.
Virus	Son partículas constituidas por ADN o RNA, cubiertos por proteínas que atacan a una célula viva (Romero, 2002a).

Fuente: Autores

Agua residual doméstica e industrial

El agua residual doméstica, como su nombre lo indica, es la derivada de las actividades cotidianas de los seres humanos como cocinar, lavar, bañarse y otras. Pueden ser combinaciones de aguas negras, aguas lluvias, aguas grises, sin embargo, su composición y carga contaminante es heterogénea ya que ninguna población es igual. Por su lado, el agua residual industrial es la generada en procesos de empresas cuya composición y carga contaminante depende de la función, tamaño y tipología de la industria (Romero, 2002b).

Aguas negras y grises

Las aguas negras son resultantes de los inodoros, transportan excrementos y orina por lo que tienen altas cantidades de sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales. Por otro lado, las grises son resultado de duchas, lavamanos y lavadoras, contenidas de jabones y detergentes aportantes de DBO, es decir, todas las generadas en la actividad doméstica excluyendo a las del inodoro (Romero, 2002b).

Tecnologías para el tratamiento del agua

Las fuentes de agua dulce siempre han sido motivo de contaminación, ya sea por causas antropogénicas o por causas naturales, por tanto, desde hace ya mucho tiempo se ha buscado varios métodos para su purificación; entre los más conocidos se tiene la sedimentación, filtración, cloración, aireación, purificación mediante ozono y destilación (Marín, 2012).

Energía solar

Es una energía renovable no contaminante que proviene del sol que llega a la Tierra en forma de calor, luz y rayos ultravioletas; esta energía, almacenada adecuadamente puede convertirse en energía térmica y/o eléctrica. En Ecuador se tiene una condición de privilegio respecto al sol ya que el ángulo de incidencia de este es perpendicular a la superficie terrestre durante todo el año. Esta ventaja se traduce en mayor recepción de energía solar limitado únicamente a las condiciones climatológicas locales (INER, 2015). Una de sus pocas desventajas es su intermitencia ya que esto ocasiona que, en muchos casos, su rendimiento energético sea bajo. No obstante, su campo de ocupación es muy variado ya que puede ser utilizada para calentadores solares, cocción de alimentos, calefacción, energía eléctrica por medio de paneles solares, climatización de piscinas y, como ya se ha mencionado en acápite anteriores, la purificación del agua mediante la destilación (Baird, 2001).

Destiladores solares

Son sistemas que, a través de la captación de energía solar, simulan el ciclo hidrológico de evaporación y condensación de agua purificando en el proceso, el agua producto de destilación generalmente queda total o parcialmente libre de hongos, bacterias, virus, etc. Existen destiladores

solares que dependiendo de la cantidad de agua destilada que se pueden obtener se clasifican como industriales o domésticos (Santín, 2004).

De forma no natural, la destilación es el proceso en el cual una sustancia colocada en un recipiente herméticamente cerrado y conectado a un condensador se convierte en vapor de agua, sube y al pasar nuevamente por el condensador es convertido en líquido que luego es recolectado (Aguapuraysana, 2009). La evaporación particularmente comienza cuando el líquido aumenta su energía cinética hasta que algunas moléculas logran liberarse de la atracción de las adyacentes y se convierten en vapor (Castro, 2012). Por su parte, la condensación sucede cuando la presión de agua es superior a la presión de vapor de saturación; en el entorno natural esta fase es la responsable de la formación de las nubes y del rocío (Rice, 2011). Es importante resaltar que en la fase de condensación el desprendimiento de energía es igual a la del calor latente de la vaporización, por lo que es fundamental la existencia de núcleos de condensación, llamados también partículas higroscópicas, que, por su capacidad de absorber humedad, evitan que el agua persista en forma de vapor (Nebel et al., 1999).

En la actualidad existen muchos modelos de destiladores solares que, pese a tener el mecanismo de funcionamiento similar, la configuración de sus distintos componentes determina su grado de eficiencia (Sitiosolar, 2013). En este sentido, el destilador solar escogido para el presente trabajo fue el de dos vertientes ya que es el modelo, debido por el fácil manejo, limpieza y coste, más eficiente respecto a sus modelos anteriores.

Factores que interfieren en la destilación solar

Los principales factores a considerar para la destilación solar son la temperatura ambiente, la humedad relativa, la velocidad del viento y la heliofanía (Comisión Nacional del Agua, 2010). Particularmente, la heliofanía figura la duración del brillo solar durante el día, medido generalmente a través de una faja de papel que va quemándose ubicada en un instrumento creado para el efecto llamado heliofanógrafo (Hidrología, 2014).

Variables secundarias en la radiación solar

De manera general las variables secundarias de la radiación solar que fueron tomadas para el cálculo fueron las siguientes:

Cuadro N° 4: Variables secundarias en la radiación solar usadas para el cálculo

Intensidad de radiación solar en Ecuador	(INER, 2015 págs. 2,5)
Declinación solar (δ)	(Duffie et al., 2005 pág. 13)
Ángulo horario (ω_s)	(Duffie et al., 2005 pág. 16)
Número de horas de sol teóricas(N)	(Duffie et al., 2005 pág. 17)
Número de horas de luz solar real(nr)	(Duffie et al., 2005 pág. 17)
Constante solar (Gsc)	(Duffie et al., 2005 pág. 6)
Radiación extraterrestre diaria sobre una superficie horizontal (H_o)	(Duffie et al., 2005 pág. 37)
Radiación solar diaria promedio terrestre sobre una superficie horizontal(H)	(Duffie et al., 2005 pág. 66)
Índice de claridad(KT)	(Duffie et al., 2005 pág. 71)
Radiación solar difusa horaria en una superficie horizontal(H_d)	(Duffie et al., 2005 pág. 78)
Radiación solar directa horaria en una superficie horizontal(H_b)	(Duffie et al., 2005 pág. 80)
Factor de cambio de ángulo de incidencia en el transcurso del día(R_b)	(Duffie et al., 2005 pág. 24)
Estimación de la radiación solar en una superficie inclinada (HT)	(Duffie et al., 2005 pág. 103)
Radiación directa sobre una superficie inclinada(H_bT)	(Duffie et al., 2005 pág. 103)
Radiación difusa sobre una superficie inclinada(H_dT)	(Fernández, s.f. pág. 22)
Radiación reflejada por el suelo (H_rT)	(Fernández, s.f. pág. 23)
Cálculo de la energía solar disponible para la transferencia de calor y masa	(Duffie et al., 2005 pág. 643)
Transferencia de calor por conducción (qc)	(Duffie et al., 2005 pág. 154)
Resistencia térmica de las paredes del aislante (Req)	(Duffie et al., 2005 pág. 398)
Coeficiente de calor convectivo (hct)	(Duffie et al., 2005 pág. 164)
Resistencia térmica equivalente del aislante (kb)	(Duffie et al., 2005 pág. 165)
Transferencia de calor por radiación en el vidrio (qrg)	(Duffie et al., 2005 pág. 168)
Temperatura del cielo (Ts)	(Castilla, 2007 pág. 65)
Calor perdido por convección del vidrio (qcg)	(Conesa, 2013 pág. 7)
Calor perdido por radiación del agua (qrw)	
Calor perdido por convección del agua (qcw)	(Góngora et al., 2009 pág. 10)
Calor perdido por evaporación (qe)	(FAO, 2016 pág. 1)

Fuente: Autores

Normativa ambiental aplicable

En Ecuador, el agua residual doméstica e industrial, son desechadas en su mayoría a cuerpos de agua directamente sin ningún tratamiento, no obstante, si existen empresas que tienen plantas de tratamiento (PTAR). Por este motivo, existe ya un ente de regulación y control, en este caso, el Ministerio del Ambiente, mismo que en función de Normas Técnicas, entre otras cosas, establecen límites máximos permisibles de descarga. A manera de resumen y en base al Libro VI Anexo 1 del

TULSMA, donde se establecen las directrices y consideraciones a tomarse en cuenta para la descarga a un cuerpo de agua dulce, se elabora el siguiente cuadro:

Cuadro N° 5: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y Grasas.	Sustancias solubles en hexano	mg/L	0,3
Alkil mercurio		mg/L	No detectable
Aluminio	Al	mg/L	5,0
Arsénico total	As	mg/L	0,1
Bario	Ba	mg/L	2,0
Boro total	B	mg/L	2,0
Cadmio	Cd	mg/L	0,02
Cianuro total	CN ⁻	mg/L	0,1
Cloro Activo	Cl	mg/L	0,5
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo ECC	mg/L	0,1
Cloruros	Cl ⁻	mg/L	1 000
Cobre	Cu	mg/L	1,0
Cobalto	Co	mg/L	0,5
Coliformes Fecales	NMP	NMP/100 ml	¹ Remoción > al 99,9 %
Color real	Color real	unidades de color	Inapreciable en dilución: 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/L	0,2
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/L	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O ₅ .	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/L	250
Estaño	Sn	mg/L	5,0
Fluoruros	F	mg/L	5,0
Fósforo Total	P	mg/L	10,0
Hierro total	Fe	mg/L	10,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/L	20,0
Manganeso total	Mn	mg/L	2,0
Materia flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/L	0,005
Níquel	Ni	mg/L	2,0
Nitratos + Nitritos	Expresado como Nitrógeno (N)	mg/L	10,0

Fuente: (Sabando, 2016)

Para la etapa constructiva destilador se utilizó acero inoxidable (para uso en alimentos) en la construcción de la bandeja y canales que van a alojar el agua residual a ser tratada, para evitar contaminación de minerales, la base se hizo de hierro, siendo el soporte de la lana de vidrio (aislante térmico) cuya función era mantener una temperatura constante durante el proceso de destilación, la cubierta se realizó en vidrio a un ángulo de 30° de inclinación para obtener una buena recepción de la radiación solar. El costo aproximado del destilador fue de \$642,00.

Pruebas experimentales del destilador solar para tratar el agua residual

Una vez que el equipo de destilación solar fue instalado se procedió a desarrollar las pruebas experimentales, para verificar el grado de efectividad de remoción de contaminantes, presentes en tres tipos de aguas residuales (domésticas, industriales, domestica-industrial) y así obtener datos que permitan evidenciar el funcionamiento del sistema. Los materiales usados y el procedimiento para la recolección de la muestra, fue el mismo para los tres tipos de agua residual.

Todas las aguas recolectadas se colocaron en un sedimentador y posteriormente pasaron por un filtro, en el afán de reducir las partículas sólidas para facilitar la destilación de estas. La caracterización inicial de estas muestras se realizó 12 horas después. Al igual que con la recolección. La caracterización inicial fue llevada a cabo de igual manera para los tres tipos de agua residual, eliminado para el agua residual industrial los parámetros no requeridos por la norma.

Metodología

En primera instancia, a través de un análisis de estado del arte se caracteriza física, química y microbiológicamente el agua residual, y de manera específica aquella provenientes de tres fuentes de descarga: domésticas, industrial y mezcla doméstica-industrial. Luego se procede con el dimensionamiento, diseño y construcción del destilador solar. Finalmente, una vez construido e implementado el sistema de depuración se pretende evaluar la eficiencia del destilador solar en base a la caracterización de las aguas residuales antes y después del tratamiento de destilación. Para el diseño del sistema de destilador solar para agua residual se ejecutó una etapa de recolección de datos bibliográficos sobre experimentaciones similares y trabajos que tratemos temáticas afines. A partir de esta investigación previa se definen las ecuaciones de dimensionamiento y parámetros de diseño a ser utilizadas; teniendo en consideración aquellos que hayan obtenido valores altos de eficiencia en cuanto remoción de contaminantes. Como segundo criterio, se tomó un diseño

eficiente y económico en comparación de los otros tipos de destiladores tomando en cuenta, sobre todo, su aplicación real en un contexto social local.

La etapa de experimentación se llevó a cabo en las instalaciones del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), localizado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). Durante este período, también se llevaron a cabo una serie de análisis de control, identificando modalidades de operación del equipo y determinando la eficiencia máxima alcanzada, en cuanto a reducción de carga contaminante se refiere. Dichos análisis se realizaron en el Laboratorio de Calidad de Agua de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.

Resultados y discusión

Los puntos de descargas identificadas y seleccionadas fueron los pertenecientes “El Batán” al Domicilio de la Familia Amaguayo Sánchez y Empresa TEIMSA los cuales cumplieron con características detalladas a continuación.

- Punto 1: Doméstica – Industrial: el punto de descarga de “El Batán” (coordenadas 17 M, 759958.30 m Este, 9813888.19 m Sur, 2754 m.s.n.m.), está ubicado en un sector domiciliario; donde existen familias dedicadas a la producción de bloques de construcción.
- Punto 2: Doméstico: el punto de descarga de la “Familia Amaguayo-Sánchez”, (coordenadas 17 M, 760091.00 m Este, 9816267.00 m Sur, 2784 m.s.n.m.) pertenece al domicilio de una familia compuesta de 5 integrantes.
- Punto 3: Industrial: el punto de descarga de la “Empresa TEIMSA” (coordenadas 17 M, 761076 m Este, 9859141 m Sur, 2997 m.s.n.m.), se dedica al negocio del teñido de telas, en las cuales se emplean una gran cantidad de químicos; dicha empresa ya cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales.

Los resultados obtenidos de la experimentación se detallan a continuación:

Cuadro N° 6: Datos obtenidos de la eficiencia de remoción de contaminantes del agua residual.

Punto 1: Agua residual doméstica-industrial			
Parámetros	Agua residual antes del tratamiento	Agua tratada medición Final	Eficiencia de remoción de contaminantes
Color	44	9	79.55%
Turbiedad	59.2	3.64	93.03%
DBO5	91	15	83.52%
DQO	68	9	86.76%

Coliformes Fecales	10000	20	99.80%
Coliformes Totales	84000	2410	97.13
Punto 2: Agua residual doméstica			
Color	32	5	84.38%
Turbiedad	63.3	0.5	99.21%
DBO5	64	7	89.06%
DQO	226	9	96.02%
Coliformes Fecales	2100	1	99.95%
Coliformes Totales	30000	873	97.09%
Punto 2: Agua residual industrial			
Color	3006	28	99.07%
Turbiedad	191	2.25	98.82%
DBO5	2800	12	99.57%
DQO	4400	33	99.25%
Sulfatos	5200	9	99.83%

Fuente: (Sabando, 2016)

Conclusiones

El destilador fue diseñado y construido fue dimensionado a partir de modelos preestablecidos tomando en consideración sobre todo la eficiencia en su funcionamiento y los costos de fabricación.

El equipo completo de 4 litros de capacidad requiere para su emplazamiento un área aproximada de 1,20 m². Adicionalmente, es importante recalcar que fue necesario una inclinación del vidrio de 30° ya que esto permite una mayor transmitancia y aprovechamiento de los rayos solares.

En cuanto a resultados, se pudo concluir que para el agua residual industrial-doméstica la eficiencia alcanza el 89.96% en la disminución de contaminantes, para el agua residual doméstica alcanza el 94.28% y de aguas residuales únicamente industriales alcanzar hasta el 99.31% de disminución de contaminantes, esto en base a los parámetros de la caracterización de las aguas establecidos.

Puede decirse entonces de manera fehaciente que la implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales mediante el destilador solar es realmente eficiente, ya que además de que la calidad del agua resultante cumple con la normativa para ser evacuada sin perjuicio e incluso apta para uso agrícola, requiere de una única inversión económica para ser construida. Así también, una de las ventajas que tiene es el espacio físico mínimo que requiere, su bajo consumo energético y que requiere únicamente funciones periódicas de limpieza que pueden ser llevadas a cabo por personal no especializado.

Como recomendación final se exhorta a la realización de análisis adicionales de otros parámetros químicos ya que podrían ser aptos para otro tipo de uso del agua tratada como por ejemplo el riego o fines recreativos.

Referencias

1. AGUAPURAYSANA (2009). Destilación de agua es un proceso natural. [en línea]. [Consulta: 15 mayo 2016]. Disponible en: <https://aguapuraysana.com/destilacion-de-agua-un-proceso-natural/+&cd=9&hl=es&ct=clnk&gl=ec>
2. BAIRD, C. (2001) Química ambiental. [en línea]. s.l.: Reverte, [Consulta: 10 mayo 2016]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=bgUaHUqGPYIC&dq=Qu%C3%ADmica+ambiental&hl=es&source=gbs_navlinks_s
3. CASTILLA PRADOS, N. (2007). Invernaderos de plástico: tecnología y manejo. [en línea] s.l.:Mundi-Prensa Libros, [Consulta: 6 mayo 2016]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=2kQZw3fNEPMC&dq=Invernaderos+de+pl%C3%A1stico:+tecnolog%C3%ADa+y+manejo&hl=es&source=gbs_navlinks_s
4. CASTRO, D. (2012) Factores que determinan la evaporación. [en línea]. [Consulta: 18 mayo 2016]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/91320497/FACTORES-QUE-DETERMINAN-LA-EVAPORACION>
5. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (2010). Manual Teórico Práctico del Observador Meteorológico de Superficie. [en línea]. [Consulta: 06 abril 2016]. Disponible en: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD001679.pdf>
6. CONESA FERRER, J. A. (2013). Mecanismos de transferencia de calor. [en línea]. [Consulta: 29 abril 2016]. Disponible en: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/34475/1/Mecanismos%20de%20transmisi%C3%B3n%20de%20calor%20\(CONDUCCION,%20CONVECCION,%20RADIACION\).pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/34475/1/Mecanismos%20de%20transmisi%C3%B3n%20de%20calor%20(CONDUCCION,%20CONVECCION,%20RADIACION).pdf)
7. DUFFIE, J. A., & BECKMAN, W. A. (2005). Solar Engineering of Thermal Processes. [en línea]. 4th Edición. Hoboken (New Jersey-USA): Fohn Wiley & Sons, [Consulta: 27 abril 2016]. Disponible en: https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi3_62Rq5vTAhVLNSYKHcEgBh4QFggiMAA&url=http%3A%2F%2Fgearju.com%2F225768904560%2FData%2FEngineering%2FSolar%2F

- 2FSolar%2520Engineering%2520of%2520Thermal%2520Processes%2C%25204th%2520Edition%2520%2520GearTeam.pdf&usg=AFQjCNEb_YXYv55J6OVepBswtEz46NrpT w&bvm=bv.152180690,d.eWESolar%20Engineering%20of%20Thermal%20Processes,%204th%20Edition%20-%20GearTeam%20.pdf
8. ESCALANTE, K., et. al. (2010). “*Aplicaciones de herramientas de investigación acción participativa para purificación y calentamiento de agua para uso sanitario en comunidades andinas aisladas de Salta.*” Avances en energías renovables y medio ambiente, [en línea]. (Argentina) n°14 pp 41. [Consulta: 12 abril 2016]. ISSN 0329-5184. Disponible en: http://www.conicet.gov.ar/new_scp/detalle.php?keywords=&id=05446&inst=yes&articulos=yes&detalles=yes&art_id=1038100
 9. FERNÁNDEZ DÍEZ, P. (s.f.). Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura. [en línea]. [Consulta: 29 abril 2016]. Disponible en: http://manager.redsauce.net/AppController/commands_RSM/api/api_getFile.php?itemID=56&propertyID=20&RStoken=59e8ac1045d03e2ff6564c0638315f38
 10. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (2016). Una evaluación estratégica de la potencialidad para la piscicultura. [en línea]. [Consulta: 11 mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/005/w5268s/W5268S08.html>
 11. GÓNGORA LEYVA, E., et. al. (2009). Coeficientes de transferencia de calor en enfriadores de mineral laterítico a escala piloto”. Minería Y Geología. [en línea]. (Cuba) 25(3), pp. 10 - 11. [Consulta: 06 mayo 2016]. ISSN 19938012. Disponible en: <file:///C:/Users/SYSTEMarket/Downloads/103-207-2-PB.pdf>
 12. INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES. “SOLAR” (2015). (Ecuador). pp. 2-9. [Consulta: 04 mayo 2016]. Disponible en: http://www.iner.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/12/SOLAR_DOSSIER.pdf
 13. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (2014). “Especificaciones sobre el registro y procesamiento de datos”. ANUARIO METEOROLÓGICO. [en línea]. (Ecuador) 51. pp. 4-8 [Consulta: 03 mayo 2016]. Disponible en: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202011.pdf>

14. INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (2007). Guía técnica para el diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos. Eficiencia y Ahorro Energético. [en línea], (España), 8, pp. 9-17 [Consulta: 05 mayo 2016]. ISBN 978-84-96680-08-1. Disponible en: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10540_Disenyo_y_calculos_aislamiento_AISLAM_GT3_07_01ee3c15.pdf
15. J. NEBEL, B., & WRIGHT, R. (1999) Ciencias ambientales: ecología y desarrollo sostenible. [en línea]. Pearson Educación. [Consulta: 11 mayo 2016]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books/about/Ciencias_ambientales.html?id=sy0dCa8xC5MC
16. MARÍN GALVÍN, R. (2012). Procesos Físicoquímicos en Depuración de Aguas. [en línea]. España: Díaz de Santos, [Consulta: 09 mayo 2016]. Disponible en: <http://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788499693873.pdf>
17. METCALF, & EDDY (1996). Ingeniería de aguas residuales: Vol. 1 y Vol. 2: Tratamiento, vertido y reutilización. 3a edición. Madrid - España: McGraw - Hill, pp. 1 - 1043.
18. RICE, WILLIAM (2011). La Condensación. [en línea]. Teacher Created Materials. [Consulta: 29 mayo 2016]. Disponible en: [https://books.google.com.ec/books?id=q8XOyntKhcEC&dq=\).+La+Condensaci%C3%B3n.+Teacher+Created+Materials&source=gbs_navlinks_s](https://books.google.com.ec/books?id=q8XOyntKhcEC&dq=).+La+Condensaci%C3%B3n.+Teacher+Created+Materials&source=gbs_navlinks_s)
19. ROMERO ROJAS, Jairo Alberto (2002a). Calidad del agua. Bogotá-Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería. pp. 65-74.
20. ROMERO ROJAS, Jairo. Alberto (2002b). Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño. 2a ed. Bogotá-Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, pp. 17-19.
21. SABANDO, Andrea (2016). Diseño y construcción de un destilador solar para aguas residuales en la ciudad de Riobamba. (tesis). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba.
22. SANTÍN LUNA, Cesar Eduardo (2004). Modelación y simulación dinámica para el diseño de un destilador solar. [en línea]. (tesis). Universidad Nacional de Loja, Ecuador. pp. 19-58. [Consulta: 29 abril 2016]. Disponible en:

[http://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/16572/1/Sant%C3%ADn%20Luna,%20C%C3%A9sar %20Eduardo.pdf](http://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/16572/1/Sant%C3%ADn%20Luna,%20C%C3%A9sar%20Eduardo.pdf)

23. SITIOSOLAR (2013). Los destiladores solares. [en línea]. [Consulta: 02 abril 2016].
Disponible en: <http://www.sitiosolar.com/los-destiladores-solares/>.

©2022 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).