

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Prototipo de filtro percolador en lecho filtrante de PET con calentamiento solar para depuración de aguas residuales domésticas en condiciones altoandinas

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Por:

Liz Maribel Callo Luque

Yhon Carlos Incaluque Sortija

Asesor:

Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

Juliaca, noviembre de 2022

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

Juan Eduardo Vigo Rivera, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: **“PROTOTIPO DE FILTRO PERCOLADOR EN LECHO FILTRANTE DE PET CON CALENTAMIENTO SOLAR PARA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN CONDICIONES ALTOANDINAS”** constituye la memoria que presenta los Bachilleres **Liz Maribel Callo Luque** y **Yhon Carlos Incaluque Sortija** para obtener el título de Profesional de Ingeniero Ambiental cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad de los autores, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca, a los 5 días del mes de diciembre del año 2022



Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

Asesor



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 18 día(s) del mes de noviembre del año 2022, siendo las 9:30 horas, se reunieron en el Salón de Grados y Títulos de la Universidad Peruana Unión, Filial Juliaca, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: Ing. Nancy Luzari Rafael, el secretario: Ing. Verónica Haydée Pavi Mamoni y los demás miembros: Msc. Rosa Adelina Gallata Chura y el asesor: Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera.

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: Prototipo de filtro percolador en lecho filtrante de PET con calentamiento solar para depuración de aguas residuales domésticas en condiciones altoandinas

de el(los)/la(las) bachiller(es): a) Yhon Carlos Incalegue Sortija
 b) Liz Maribel Gallo Inquis

conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Ambiental
 (Nombre del Título Profesional)

con mención en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/a(la)(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): Yhon Carlos Incalegue Sortija

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy Buena</u>

Candidato (b): Liz Maribel Gallo Inquis

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy Buena</u>

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]
 Presidente
[Firma]
 Asesor
[Firma]
 Candidato/a (a)

[Firma]
 Miembro

[Firma]
 Secretario

 Miembro
[Firma]
 Candidato/a (b)

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
1 INTRODUCCIÓN.....	9
2 METODOLOGÍA.....	12
2.1. Implementación del filtro percolador	12
2.2. Puesta en marcha del filtro percolador	14
2.3. Balance de energía.....	15
2.4. Marco normativo peruano e internacional.....	16
2.5. Identificación del agua residual doméstica.....	16
3 RESULTADOS	17
3.1. Características del agua residual doméstica	17
3.2. Porcentaje de remoción	17
3.3. Comportamiento de los parámetros.....	19
3.4. Comportamiento de la temperatura y energía acumulada	20
3.5. Cumplimiento del marco normativo.....	21
3.6. Porcentajes de remoción de carga orgánica con estudios que emplearon filtros percoladores bajo condiciones altoandinas y no altoandinas	22
4 DISCUSIONES	23
5 CONCLUSIONES.....	26
REFERENCIAS	27
ANEXOS.....	32
6.1 Evidencia de Sumisión	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites máximos permisibles según las normas peruanas e internacionales.....	13
Tabla 2. ratio de biodegradabilidad del agua residual doméstica.....	13
Tabla 3. Características del agua residual doméstica a tratar.....	14
Tabla 4. Prueba T de Student para muestras relacionadas.....	15
Tabla 5. Energía captada del sistema de calentamiento solar.....	17

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diseño del sistema de calentamiento del filtro percolador	11
Figura 2. Diseño 3D del filtro percolador con calentamiento solar.....	12
Figura 3. Línea de tiempo del Proceso de tratamiento del agua residual.....	13
Figura 4. Porcentaje de remoción de DBO5, DQO, Turbidez.....	15
Figura 5. Comportamiento de las cinéticas de los parámetros de a) Demanda Bioquímica de Oxígeno, b) Demanda Química de Oxígeno y c) Turbiedad.....	17
Figura 6. Porcentaje de remoción de DBO5, DQO, Turbidez.....	17
Figura 7. Evaluación del cumplimiento del marco normativo nacional e internacional.....	19
Figura 8. Porcentajes de remoción de carga orgánica de diferentes estudios en condiciones altiplánicas y no altiplánicas.....	20

Prototipo de filtro percolador en lecho filtrante de PET con calentamiento solar para depuración de aguas residuales domésticas en condiciones altoandinas

RESUMEN

El estudio tiene como objetivo la implementación de un prototipo de filtro percolador con lecho filtrante a base de PET reciclado con calentamiento solar para depuración de aguas residuales domésticas en zonas altiplánicas. El filtro percolador es de tipo bach y posee dos cilindros concéntricos, el cilindro interior (0.36x1.2mØ) tiene una capacidad de 0.15m³, y el cilindro hueco (0.48x1.4mØ) tiene un volumen de 0.10m³. El cilindro interior fue dividido en tres niveles de lecho filtrantes de PET reciclado (esponjas, trozos de tubo corrugado y tapas de botellas) donde se desarrolló el proceso microbiano. En el cilindro hueco recubierto con fibra de poliuretano se realizó el intercambio de calor. Para el calentamiento del filtro se empleó un colector solar de polietileno de alta densidad (100m de longitud y 0.5 pulgadas de diámetro) y se usó agua como fluido caloportador. Se depuró 100 L de aguas residual domestica donde se monitoreo: turbiedad, pH, DBO₅, DQO, y temperaturas (ambiental, filtro percolador y fluido caloportador); en un periodo de 3 semanas cada 7 días. El agua a tratar presentó características de 8.74 de pH, 148.17 UNT de turbiedad, 1043.9 mg/L de DBO₅ y 453.33mg/L DQO; y la relación DBO₅/DQO=0.43 es biodegradable. Las temperaturas medias fueron de 10.8, 24.6 y 31.4°C para la ambiental, filtro percolador y fluido caloportador, respectivamente. Los análisis finales fueron 8.7 de pH, 25.03 UNT de turbidez, 25.83mg/L de DBO₅ y 85.25mg/L de DQO; con remociones de 94.3, 90.8 y 83.1% para la DBO₅, DQO y turbidez, respectivamente. La energía acumulada por el colector solar fue 315.83KW-h. Concluyendo, que es factible depurar aguas residuales domésticas en condiciones altoandinas empleando un filtro percolador con lecho filtrante de PET con calentamiento solar y cumplir el marco normativo.

Palabras clave: agua residual doméstica, condiciones altoandinas, calentador solar, filtro percolador, lecho filtrante de PET.

Prototype of trickle filter in PET filter bed with solar heating for domestic wastewater treatment in high andean conditions

ABSTRACT

The objective of the study is to implement a prototype of a trickling filter with a filter bed based on recycled PET with solar heating for the purification of domestic wastewater in highland areas. The trickling filter is of the Bach type and has two concentric cylinders, the inner cylinder (0.36x1.2mØ) has a capacity of 0.15m³, and the hollow cylinder (0.48x1.4mØ) has a volume of 0.10m³. The inner cylinder was divided into three levels of recycled PET filter bed (sponges, pieces of corrugated tube and bottle caps) where the microbial process was developed. In the hollow cylinder covered with polyurethane fiber, the heat exchange was carried out. To heat the filter, a high-density polyethylene solar collector (100m long and 0.5 inches in diameter) was used and water was used as heat transfer fluid. 100L of domestic wastewater was purified, monitoring: turbidity, pH, BOD₅, COD, and temperatures (environmental, trickling filter and heat transfer fluid); in a period of 3 weeks every 7 days. The water to be treated presented characteristics of 8.74 pH, 148.17 NTU of turbidity, 1043.9 mg/L of BOD₅ and 453.33mg/L COD; and the BOD₅/COD=0.43 ratio is biodegradable. The average temperatures were 10.8, 24.6 and 31.4°C for the ambient, trickling filter and heat transfer fluid, respectively. The final analyzes were 8.7 pH, 25.03 NTU turbidity, 25.83mg/L BOD₅ and 85.25mg/L COD; with removals of 94.3, 90.8 and 83.1% for BOD₅, COD and turbidity, respectively. The energy accumulated by the solar collector was 315.83KW-h. Concluding, that it is feasible to purify domestic wastewater in high Andean conditions using a trickling filter with a PET filter bed with solar heating and comply with the regulatory framework.

Keywords: domestic wastewater, high Andean conditions, solar heater, trickling filter, PET filter bed.

1 INTRODUCCIÓN

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) informa que más del 80% de las aguas residuales producto de actividades humanas a nivel mundial se vierten a los ríos y mares sin ser tratadas y solo el 20% reciben tratamiento adecuado (UNESCO, 2017). En el Perú el tratamiento de aguas residuales lo realizan 50 Empresas Prestadoras de Servicios (EPS), que abarcan 290 localidades de las cuales solo 164 cuentan con tratamientos, lo cual significa que solo el 64% de las aguas residuales es tratada (SUNASS, 2022). Así mismo, según el diagnóstico realizado en junio del 2022 por la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS), la región Puno solo cuenta con 04 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales; (PTAR) Yunguyo, Lampa, Azángaro y Huancané, así mismo menciona la construcción y operación de 6 PTAR en Juliaca, Puno, Ilave, Juli, Ayaviri y Moho (SUNASS, 2022).

La Dirección de Vivienda Construcción y Saneamiento indica, que en la Región de Puno uno de los problemas principales es el vertimiento de aguas residuales sin tratamiento, que son descargadas por las ciudades que se ubican en el anillo circunlacustre, provocando riesgos en la salud de la población (MVCS, 2018). Larios et al. (2015) afirman que el tratamiento de agua residual para las descargas al alcantarillado es de suma importancia, ya que requieren un tratamiento apropiado, para su reúso o disposición final, para proteger el ambiente y la salud de la población. Yang et al. (2020) mencionan además que las descargas de aguas residuales sin tratamiento previo generan graves problemas de contaminación ambiental y riesgos a la salud. Barceló et al. (2020) declara que las aguas residuales deben pasar por un tratamiento que ayude a disminuir la toxicidad de los contaminantes. Así mismo, cumplir los límites máximos permisibles para efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas (Palta y Morales, 2013)

Pérez et al. (2016) menciona que el tratamiento de agua residual con mejores resultados son aquellos que utilizan filtros percoladores, los cuales brindan resultados satisfactorios a lo largo de su proceso, Menéndez et al. (2015) mencionan las ventajas del tratamiento de las aguas residuales por medio de FP siendo estas: menor requerimiento de energía, menor necesidad de mantenimiento de equipos, y operación más simple. Así mismo Cao et al. (2020) y Yucra (2016), mencionan que dichas ventajas hacen que los FP sean especialmente

interesantes para la depuración de las aguas residuales, además representa una solución económica-técnica de fácil construcción.

Gao et al. (2021) afirma que los FP también pueden ser usados en la recuperación de nutrientes como el nitrógeno y fósforo. Estos filtros, suelen tener como medio de soporte material sintético, piedra pómez, cerámica, o la reutilización de plástico por su alta relación de área/volumen (Qian et al., 2021). Y en la mayoría de casos se realiza la recirculación del efluente tratado (Vásquez et al., 2013). En semejanza al estudio de Noir et al. (2017), el cual emplearon plástico reutilizable como medio filtrante en los FP, favoreciendo la formación de una película microbiológica, con el porcentaje de eficiencia para la reducción de carga orgánica que es expresada en DBO₅.

En el altiplano peruano las temperaturas medias anuales varían entre 7 y -10 °C en las zonas de altitud inferior a 4000 m.s.n.m. (MINAM, 2013) dichas temperaturas intervienen en la correcta depuración de las aguas, de acuerdo a (Rossi, 2010) para que los procesos de crecimiento, degradación, producción y procreación biológica de los microorganismos se haga efectiva y eficiente se debe tener condiciones adecuadas para el crecimiento bacteriano en el rango de temperatura de 30 a 40°C, bajo estas condiciones climáticas es imposible pensar en tratamientos anaerobios de depuración donde la temperatura recomendada por la norma técnica peruana OS 090 deben ser superiores a 15°C (MVCS, 2006) sin embargo Noyola et al. (2013) recomiendan que sean superiores a los 20 °C.

La utilización de energía solar térmica, para el calentamiento de agua de es una tendencia marcada y definida a nivel mundial y existen numerosos países donde esta tecnología tiene gran difusión, en base a lo anterior se presentan los colectores solares de bajo coste los cuales ayudan a incrementar la temperatura aprovechando la radiación, con estos colectores solares basados en mangueras plásticas que tienen como ventaja la simplicidad y su bajo costo, estos colectores pueden resistir las condiciones climáticas adversas como la granizada en comparación con los colectores de placa plana patentados (Juanico y Di Lalla, 2013).

En este contexto el trabajo de investigación desarrolló un prototipo de filtro percolador con lecho filtrante a base de PET reciclado con calentamiento solar para depuración de aguas residuales domésticas en condiciones altoandinas, donde predominan las bajas temperaturas,

escasos sistemas de tratamiento de aguas residuales, pero existes altas radiaciones solares que pueden ser empleadas para estos usos.

2 MÉTODOLOGIA

2.1. Implementación del filtro percolador

El filtro percolador usado en la investigación es un diseño propio en base de los trabajos de Jaramillo y Togas (2019) y (Yucra, 2016), el filtro percolador tiene las siguientes dimensiones: altura 1.20 m, diámetro 36 cm, con un medio filtrante de material reciclado, dividido en 3 niveles; en el primer nivel son tapas de botellas (Polipropileno) que utilizó Manzanares y Ricaldi (2017) en su investigación; ya que cuenta con un área y volumen estándar. El segundo nivel consta de tubería corrugada de una longitud de 120m y en el tercer nivel se utilizó esponja de poliuretano, no biodegradable y tiene una porosidad del 95% lo cual permite el crecimiento de la biopelícula.

La parte superior del filtro está compuesto por un sistema de distribución circular con un área de 1017.9 cm², que permite la distribución del agua residual de manera uniforme. Asimismo, el filtro tiene un sistema de recirculación mediante bombeo, que consiste en la conexión de dos tanques de almacenamiento (superior e inferior) para el tratamiento de 100 L de agua residual doméstica, estos están conectados mediante una tubería de ½ pulgada de diámetro.

El diseño cuenta con un sistema de calentamiento solar de manguera de polietileno de alta densidad (HDP) de Φ ¾” con una longitud de 100m enrollado concéntricamente sobre una base de madera, que esta recubierta de una lámina de aluminio con la finalidad de incrementar la irradiancia solar. Además, el colector solar estuvo cubierto con plástico transparente con el objeto de disminuir el efecto de enfriamiento por aireación dicho sistema actúa para incrementar la temperatura del filtro en el día durante el periodo de insolación.

El filtro percolador esta recubierto con espuma de poliuretano de 1”, con el fin de retener calor y evitar la disminución de temperaturas en el reactor por efecto del enfriamiento del ambiente en zonas altiplánicas y conservar energía en horas de la noche (Alvarez, 2009). La instalación del sistema de colector solar de bajo costo se instaló en un área libre de construcciones para obtener la mayor cantidad de radiación solar. El sistema tiene instalada una bomba pecera SOBO modelo WP-6000 de 85W de potencia para recircular el fluido caloportador (agua) en el sistema de calentamiento solar, que operó desde las 09:30 a 15:30 horas. Este rango de operación fue determinado con pruebas piloto en el mes setiembre del

2021 acorde a las condiciones climatológicas de la ciudad de Juliaca- Perú (3850 m.s.n.m.), asegurando la transferencia de calor del colector solar al filtro percolador.

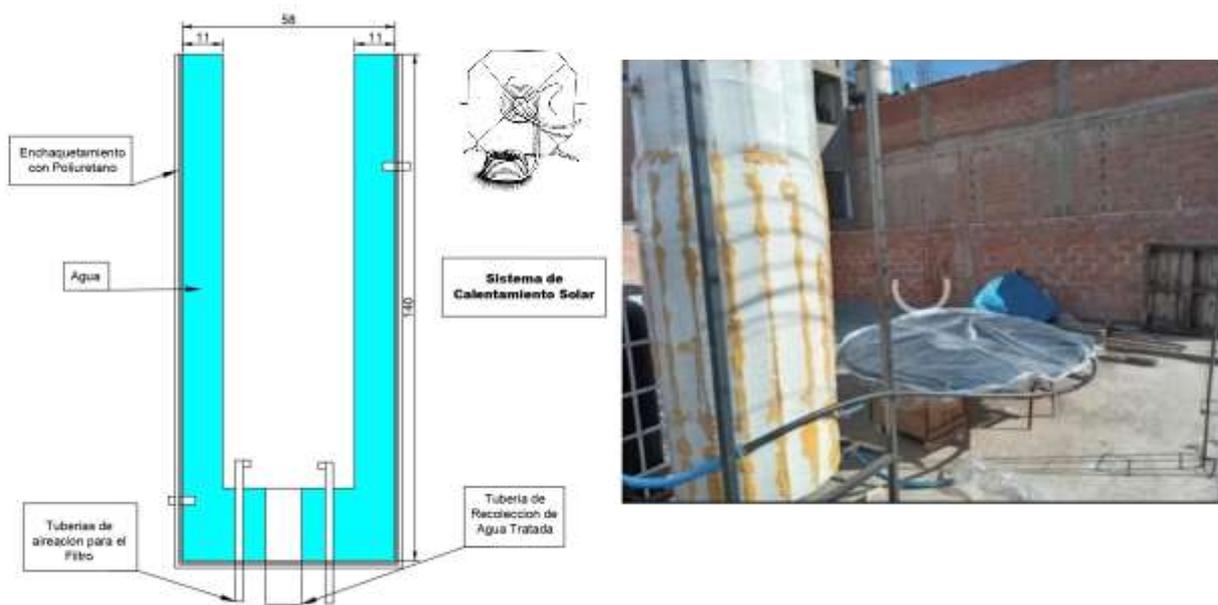


Figura 1. Diseño del sistema de calentamiento del filtro percolador

Fuente: Elaboración Propia

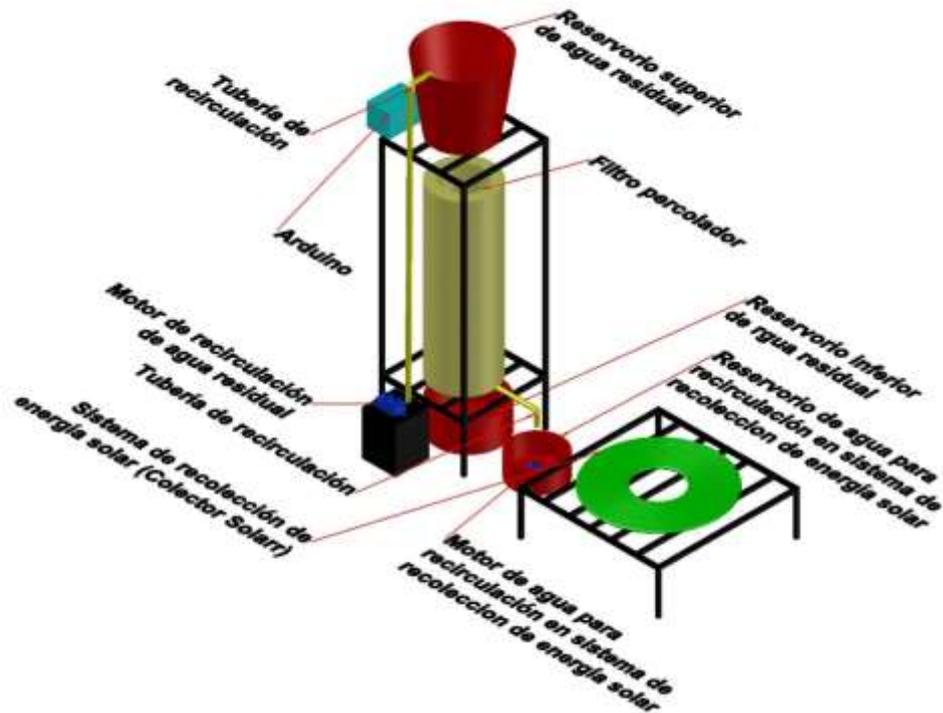


Figura 2. Diseño 3D del filtro percolador con calentamiento solar

Fuente: Elaboración Propia

2.2. Puesta en marcha del filtro percolador

Para la puesta en marcha se realizó la medición del caudal del agua residual por el método volumétrico, donde se optó por trabajar con un caudal empírico de 0.046 L/s, para evitar el lavado de la biopelícula bacteriana adherida al lecho filtrante. El filtro percolador en su diseño consta de 2 bandejas, una superior (80 L) y una inferior (110 L); para bombear el agua residual de la bandeja inferior se empleó una bomba agua de potencia de 0.5 HP, que operaba cada 40 minutos y el tiempo de bombeo era de 2 minutos.

Así mismo, para el monitoreo de temperaturas se utilizó dos sensores M135 en plataforma Nano Arduino, que monitorearon la temperatura de entrada (agua del sistema de calentamiento solar) y la temperatura de salida (filtro percolador) en intervalos de 2 minutos, que posteriormente se promediaron por cada media hora.

La activación microbiana en los 3 niveles del lecho filtrante de PET tuvo un periodo de 28 días. Posterior a ello se inició la parte experimental de depuración de 100 L de agua residual doméstica donde se realizó el monitoreo de los parámetros en 21 días cada 7 días. Para los

análisis de los parámetros se emplearon las normas APHA AWWA WPCF (2005), en el laboratorio de saneamiento ambiental de la Universidad Peruana Unión- Campus Juliaca. Los parámetros monitoreados fueron: DBO₅, DQO, pH, turbiedad y las temperaturas de la parte interna (temperatura del agua residual), la temperatura del fluido caloportador y el valor de las temperaturas ambientales se obtuvieron de la estación meteorológica de Juliaca del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).



Figura 3. Línea de tiempo del Proceso de tratamiento del agua residual

Fuente: Elaboración Propia

2.3. Balance de energía

Con el fin de conocer la cuantificación de la energía solar captada por el colector solar, se realizó el balance de energía. Para llegar a ese fin se utilizó como referencia el costo de la energía fotovoltaica presentada por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2019) (0.0677 en centavos de dólar/ KWh), porque es la más cercana a la forma de energía solar captada. Además, se utilizó como punto de comparaciones las tarifas de Electro Puno S.A.C (0.595 nuevos soles/ KWh equivalente a 0.1448 en centavos de dólar/ KWh) y la tarifa del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (0.669 nuevos soles/KWh equivalente a 0.1668 en centavos de dólar/ KWh) OSINERGMIN (2016).

Para el cálculo del balance de energía del sistema (Filtro percolador – Colector solar), se aplicó la siguientes fórmulas Ecuación 1 y 2, donde “Q” es igual a calor (Cengel y Boles, 2005).

$$Q_{\text{ganado}} = Q_{\text{perdido}} + Q_{\text{acumulado}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{calentador solar}} = Q_{\text{del medio ambiente}} + Q_{\text{del reactor}} \quad (2)$$

2.4. Marco normativo peruano e internacional

Para el cumplimiento de los parámetros que se muestran en la tabla 1 según el marco normativo peruano se aplicó el Decreto Supremo N.º 003-2010 (MINAM, 2010), y para las normas internacionales se aplicaron la norma Mexicana, Andalucía y la Unión Europea.

Tabla 1.

Límites máximos permisibles según las normas peruanas e internacionales.

Parámetro	Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.	NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT -2021	Decreto 109/2015, Reglamento de vertidos – Andalucía	Directiva 91/271/CEE del Consejo – Unión Europea
DQO (mg/L)	200	-	125	125
DBO ₅ (mg/L)	100	30	65	25
pH	6.5 - 8.5	6-Set	5.5 - 9.5	-
Turbiedad (UNT)	-	-	100	-
Temperatura (°C)	<35	-	Incremento 3°C	-

Fuente: Elaboración Propia

2.5. Identificación del agua residual doméstica

Para identificar la biodegradabilidad de las aguas residuales a tratar, se empleó la relación de biodegradabilidad DBO₅/DQO (Sánchez y García, 2018).

Para calcular la ratio se utilizó la ecuación 3

$$\text{Ratio} = \text{DBO}_5 / \text{DQO} \quad (3)$$

La tabla 2 detalla la clasificación de la ratio de biodegradabilidad.

Tabla 2.

Ratio de biodegradabilidad del agua residual doméstica.

DBO ₅ /DQO	Clase
>0.4	Muy biodegradable
0.2-0.4	biodegradable
<0.2	Poco biodegradable

Fuente: Modificado de Morant (2017)

3 RESULTADOS

3.1. Características del agua residual doméstica

La tabla 3 muestra las características del agua residual doméstica a tratar.

Tabla 3.

Características del agua residual doméstica a tratar

	Unidad	Resultados	Evaluación	Autor
DQO	mg/L	1043.92	Alta	Metcalf y Eddy
DBO ₅	mg/L	453.33	Alta	Metcalf y Eddy
Temperatura	°C	15.5	< 35	Decreto Supremo N.º 003-2010
pH	Unidad de pH	8.74	6.5-8.5	Decreto Supremo N.º 003-2011
Turbiedad	UNT	148.17	-	Decreto Supremo N.º 003-2012
Ratio	-	0.43	Biodegradable	Morant, (2017)

Fuente: Elaboración Propia

3.2. Porcentaje de remoción

La figura 4 muestra los porcentajes de remoción de los parámetros DBO₅, DQO y turbidez, monitoreados con relación al tiempo (días) de tratamiento.

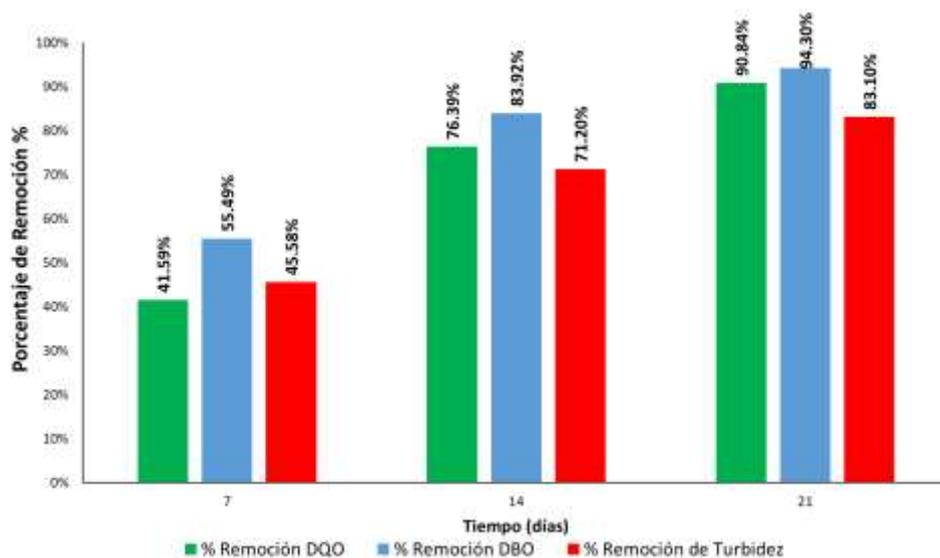


Figura 4. Porcentaje de remoción de DBO₅, DQO, Turbidez.

Fuente: Elaboración Propia

La tabla 4 detalla los resultados de la prueba estadística T de Student para muestras relacionadas.

Tabla 4.

Prueba T de Student para muestras relacionadas

		Media	Desviación estándar	Media de error estándar	t	gl	Significación	
							P de un factor	P de dos factores
Par 1	DQOin - DQOfi	948.32	15.69	9.06	104.7	2	<.001	<.001
Par 2	DBOin - DQOfin	427.5	23.22	13.41	31.88	2	<.001	<.001
Par 3	Turbini - Turbifin	123.13	2.65	1.53	80.48	2	<.001	<.001

Fuente: Elaboración Propia

Ho: No hay diferencia significativa de los parámetros DQO, DBO₅ y Turbiedad

Ha: Si hay diferencia significativa de los parámetros DQO, DBO₅ y Turbiedad

El p valor es menor a 0.001, por lo que podemos rechazar la hipótesis nula que establece que no hay una diferencia significativa entre los parámetros DQO, DBO₅ y Turbiedad. Es decir, la diferencia entre las medias en las dos condiciones es tan extrema que **es muy poco probable que haya ocurrido simplemente por casualidad**, por lo tanto, podemos concluir que es una diferencia real.

3.3. Comportamiento de los parámetros

La figura 5 muestra las cinéticas de los parámetros de a) DBO₅, b) DQO y c) Turbiedad.

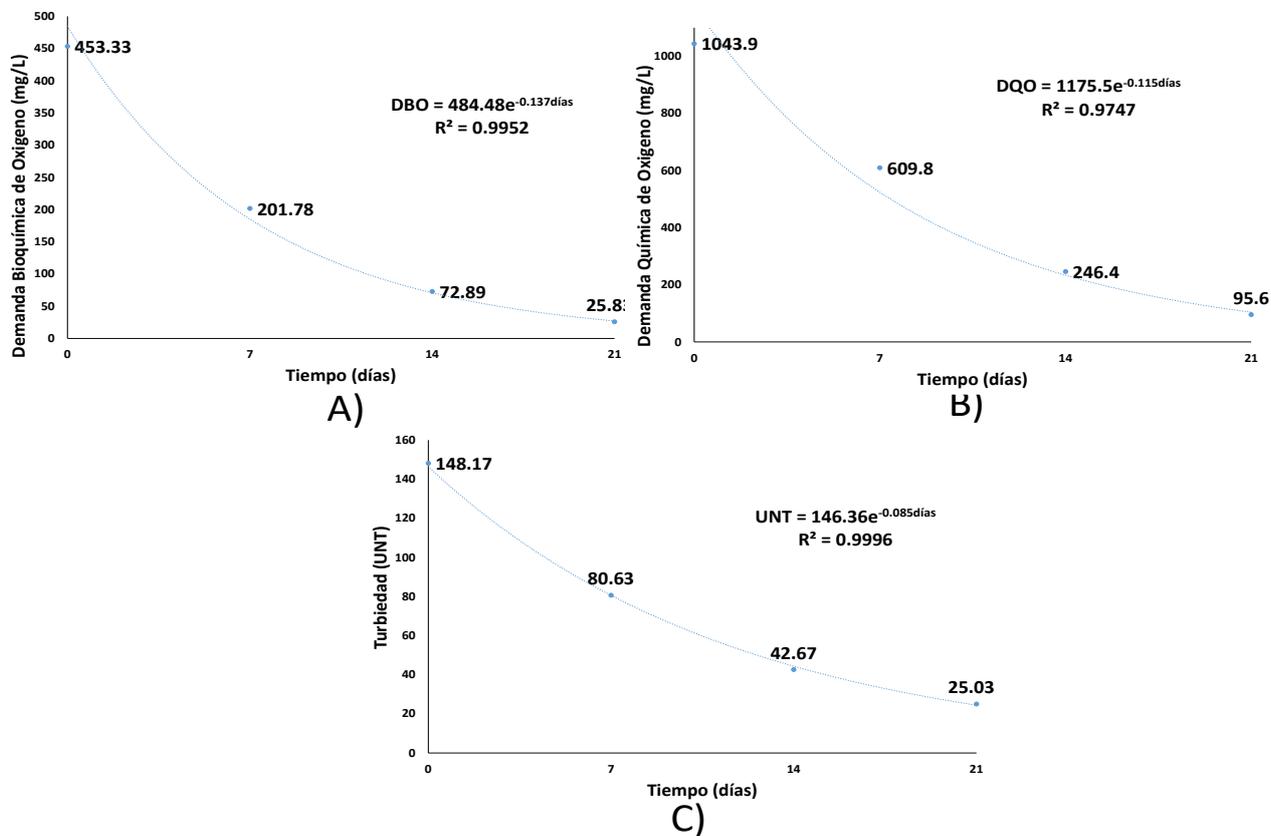


Figura 5. Comportamiento de las cinéticas de los parámetros de a) Demanda Bioquímica de Oxígeno, b) Demanda Química de Oxígeno y c) Turbiedad

Fuente: Elaboración Propia

3.4. Comportamiento de la temperatura y energía acumulada

La figura 6 muestra el comportamiento de las temperaturas media horaria diaria del 1) colector solar, 2) filtro percolador y 3) temperatura ambiental.

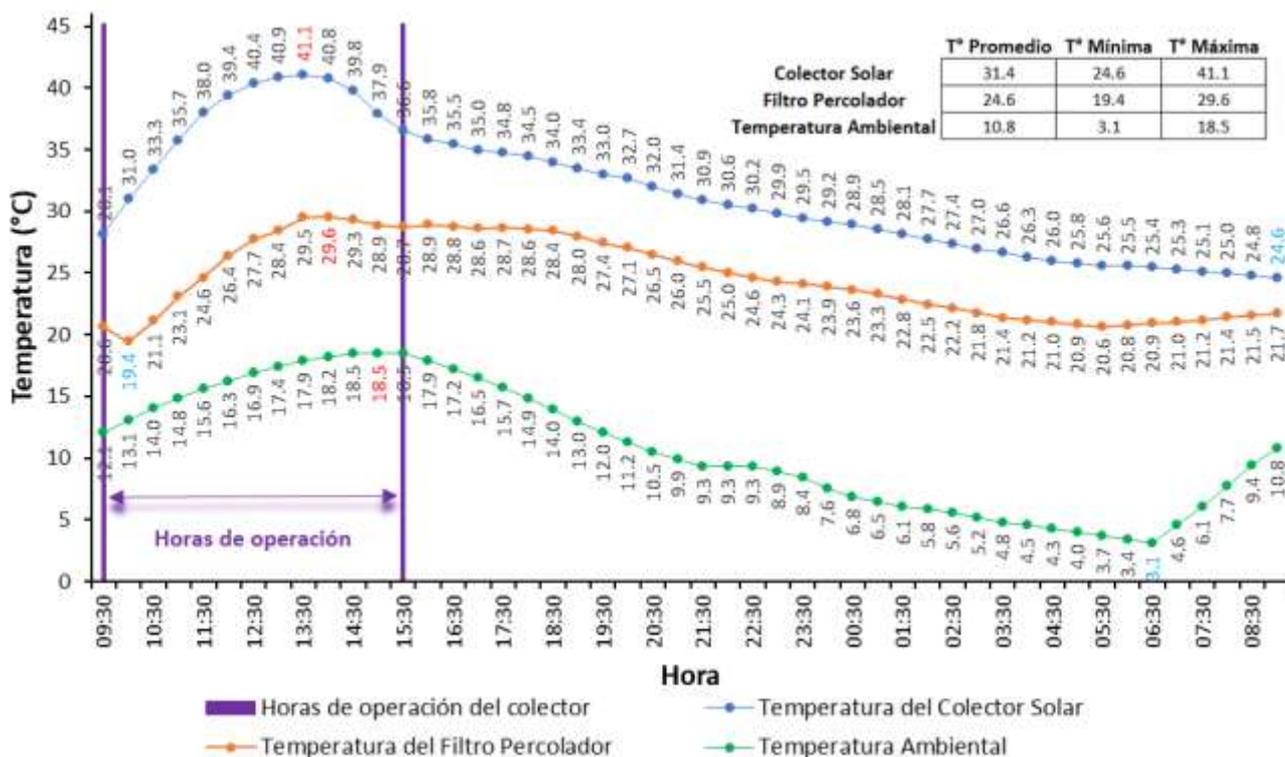


Figura 6. Comportamiento de las temperaturas media horaria diaria del 1) colector solar, 2) filtro percolador y 3) temperatura ambiental

Fuente: Elaboración Propia

La tabla 5 muestra la energía captada por el sistema de calentamiento solar, desglosada en kW-h acumulada, costo total en nuevos soles y el porcentaje de energía ahorrada si se hubiera empleado energía fotovoltaica en base al reporte de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2019)

Tabla 5.

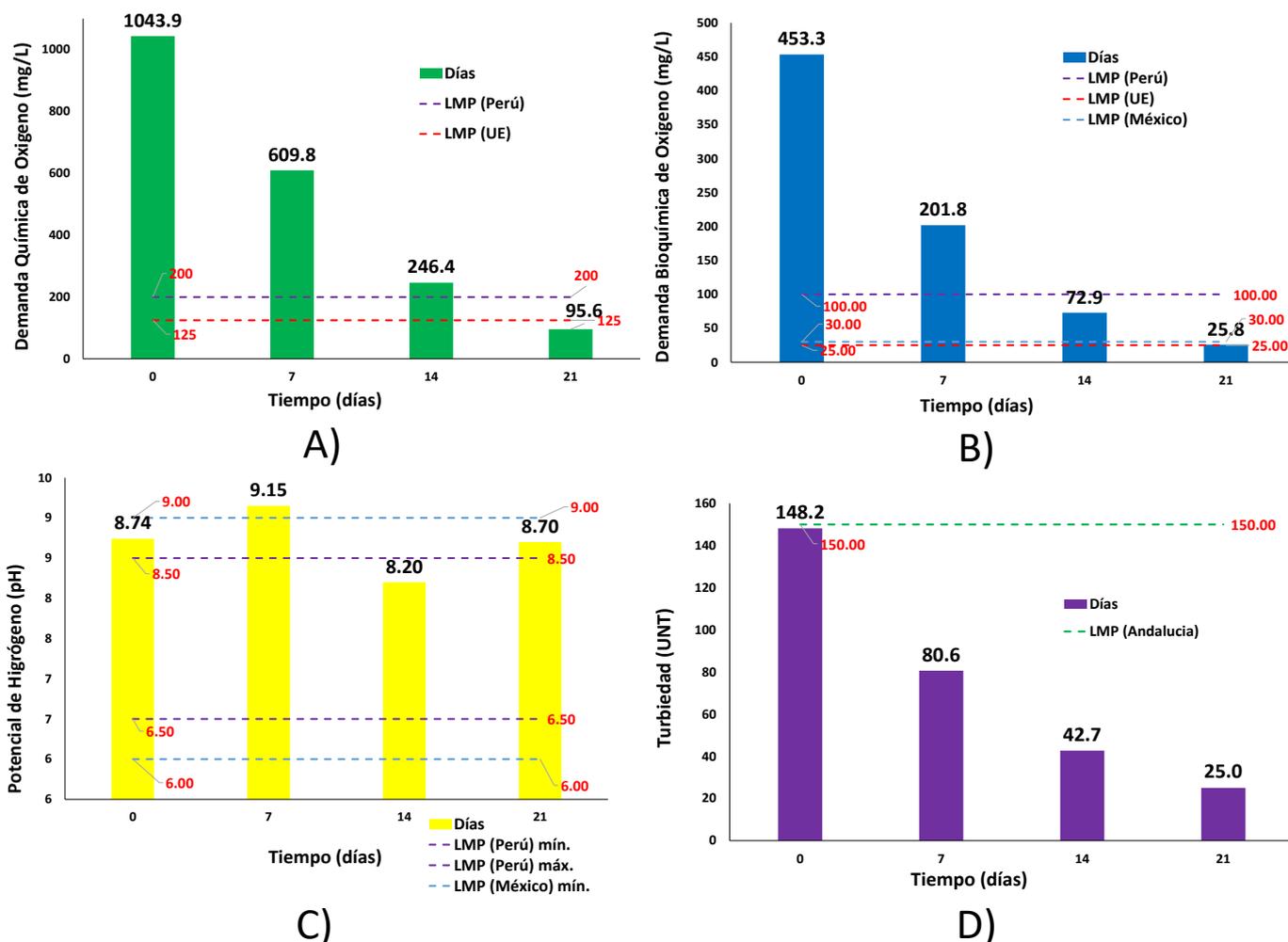
Energía captada del sistema de calentamiento solar

Institución	Costo (kW-h)	KWh (acumulado)	Costo Total	S/. ahorrados	Porcentaje
Osinerming	S/.0.669	\$0.1668	315.83	S/.77.72	59.4%
Electro Puno	S/.0.595	\$0.1448	315.83	S/.63.29	54.4%
IRENA (solar fotovoltaica)	S/.0.271	\$0.0677	195.51	-	-

Fuente: Elaboración propia

3.5. Cumplimiento del marco normativo

La figura 7 muestra el cumplimiento del marco normativo de los LMPs nacionales e internacionales de los parámetros: a) DBO₅, b) DQO, c) potencial de hidrógeno y d) turbiedad.



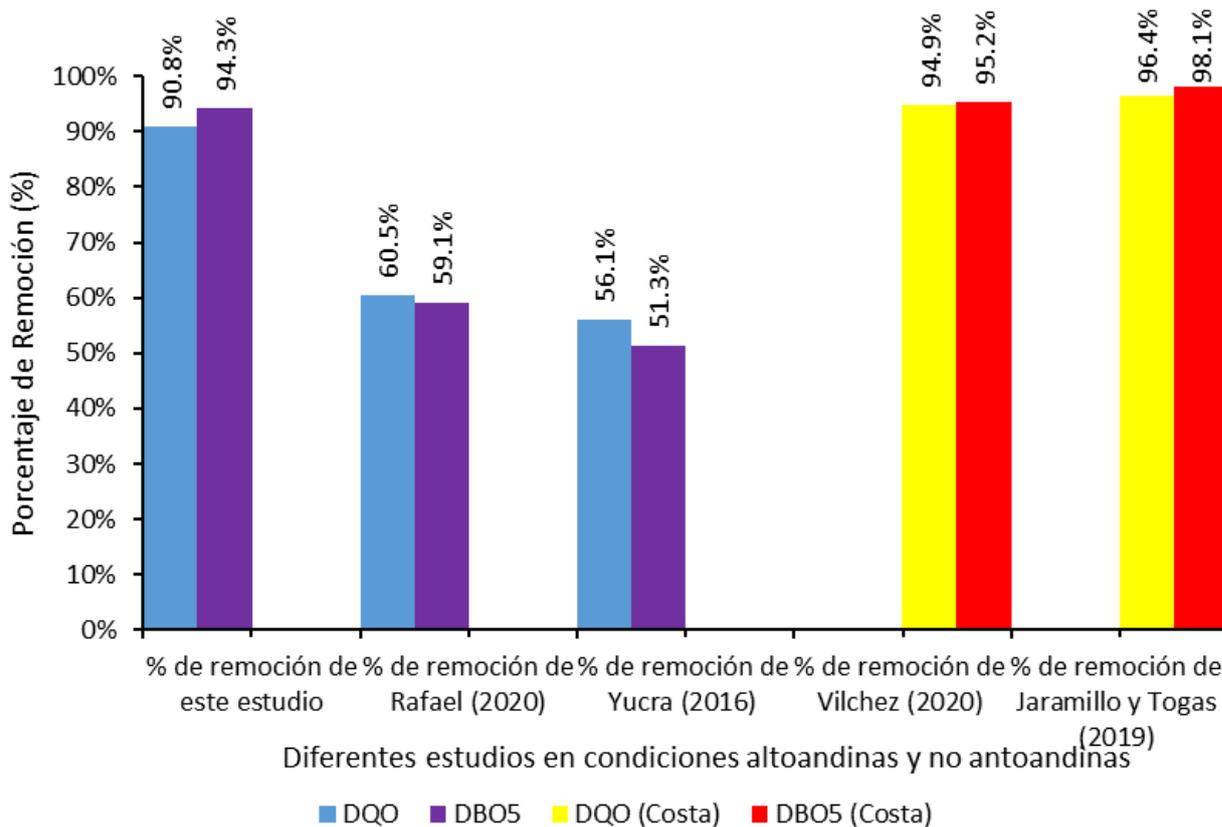
--- LMP (Perú)	Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM. – Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Domésticas o Municipales a cuerpos receptores.
--- LMP (UE)	Directiva 91/271/CEE del Consejo de 21 de mayo de 1991 sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas – Unión Europea.
--- LMP (Andalucía)	Decreto 109/2015, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de vertidos al Dominio Público Hidráulico y al Dominio Público Marítimo – Terrestre de Andalucía.
--- LMP (México)	Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Fuente: Elaboración Propia

Figura 6. Evaluación del cumplimiento del marco normativo nacional e internacional.

3.6. Porcentajes de remoción de carga orgánica con estudios que emplearon filtros percoladores bajo condiciones altoandinas y no altoandinas

La figura 8 muestra los porcentajes de remoción de carga orgánica de diferentes investigaciones en condiciones altoandinas y no altoandinas.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7. Porcentajes de remoción de carga orgánica de diferentes estudios en condiciones altiplánicas y no altiplánicas

4 DISCUSIONES

Las características del agua residual doméstica que se trató presentó una carga orgánica de 453.33 y 1043.92 mg/L de DBO₅ y DQO que de acuerdo a Metcalf y Eddy (1995) para aguas residuales doméstica la categoriza como “alta”. Además, según los parámetros hidroquímicos de aguas residuales el pH (8.74) es “alto” (Henze, 1992). Por otro lado, el ratio DBO₅/DQO=0.43 es biodegradable (Morant, 2017). Y como parámetro de referencia de transparencia del agua se monitoreó la turbiedad (148.17 UNT) (ver tabla 3).

La remoción de la carga orgánica fue de 55.49 y 41.59% de DBO₅, DQO, y la disminución de la turbiedad fue 45.58% en 7 días; 83.92, 76.39 y 71.20% para DBO₅, DQO y turbiedad en 14 días; 94.30, 90.84 y 83.10% para DBO₅, DQO y turbiedad en 21 días (ver figura 4). La DBO₅, DQO y turbiedad presentan comportamiento exponencial decreciente debido a las condiciones adecuadas para la proliferación bacteriana (temperatura promedio del filtro percolador 24.6 °C) (ver figura 4).

El filtro percolador tiene un sistema de recirculación del agua residual doméstica y de acuerdo a Rivera et al., (1999) el bombear agua residual es un factor que influye en la eficiencia del porcentaje de remoción por la inyección de oxígeno. Además, en su estudio logró un 87.4% de remoción en DQO empleando un filtro percolador con lecho de plástico. A diferencia de Romero et al. (2017) que obtuvo un 60% de remoción del DQO pero sin recirculación.

Además, la prueba t de student para muestras relacionadas, de los parámetros DBO₅, DQO y turbiedad presentan un p-valor menor a 0.01, demostrando que hay una alta significancia en la disminución de estos parámetros (ver tabla 4).

El comportamiento de la DBO₅ presenta una cinética exponencial negativa, debido a la disminución de la carga orgánica en función al tiempo. El valor que presenta es de 0.137 que según Metcalf y Eddy (1995), pertenece a efluentes secundarios. Además, el R² es superior a 0.97 demostrando que hay un buen ajuste del modelamiento (ver figura 5).

La figura 6 muestra que las temperaturas medias fueron 31.4, 24.6 y 41.41 °C para el colector solar, filtro percolador y la temperatura ambiental; las temperaturas máximas fueron 41.1, 29.6 y 18.5 °C para el colector solar filtro percolador y la temperatura ambiental; las

temperaturas mínimas fueron 24.6, 19.4 y 3.1°C para el colector solar, filtro percolador y la temperatura ambiental. Además, la figura 6 muestra que el comportamiento de las temperaturas del colector solar es superior, seguida de la temperatura del filtro percolador y la temperatura ambiental es menor.

Según, Kuntur (2016) la temperatura en la región Puno alcanza 24°C en los días más cálidos, y en las noches más frías alcanza los 2 °C, en los meses de junio a octubre. Alvarez (2009), menciona que los colectores solares planos de bajo costo como los que se utilizaron en la investigación pueden alcanzar temperaturas de 35°C. Además, Nandwani (2006) y Salcedo (2011) en sus investigaciones manifiestan que si a este tipo de colectores planos de bajo costo se les incorpora un recubrimiento para evitar efectos del enfriamiento, podrían alcanzar temperaturas hasta 50°C. En esta investigación con el colector solar de 100m de polipropileno de alta densidad con recubrimiento (plástico transparente) alcanzó 41.6°C a las 13:30 horas en los meses de setiembre a octubre. Además la investigación de Vigo Rivera (2020) que empleo colectores solares similares a condiciones altoandinas, alcanzo temperaturas promedio de 35.05°C a las 14:30 en los meses de octubre a noviembre del 2019 (ver figura 5).

Trapote (2011) declara que “la temperatura condiciona los procesos de depuración biológica”, y Metcalf y Eddy (1995) manifiesta que “el desarrollo de los microorganismos para la depuración de agua residual es de 25 °C”. La temperatura en el filtro percolador durante el tiempo experimental fue de 24.62 °C. Por esto los microorganismos han tenido temperatura adecuada en el filtro percolador para su activación y desarrollo, y en la formación de la biopelícula en los lechos filtrante del PET (esponjas, tubo corrugado y tapas de botella).

Por otro lado, el sistema de calentamiento por colector solar acumuló 315.83 KWh de energía durante los 21 días. En la tabla 6 se muestra una comparación de costos energéticos y se emplea como referencia a la energía renovable más cercana (energía fotovoltaica) con los datos de costo oficiales de IRENA (2019). La tabla 5 muestra estas comparaciones, empleando valores también de operadores energéticos del Perú como Electro Puno y Osinerming donde se muestra que se obtuvieron ahorros de energía del 54.4 y 59.4%, respectivamente.

La figura 7 muestra las comparaciones de los parámetros de DBO₅, DQO, pH y turbiedad con el cumplimiento del marco normativo nacional e internacional. El parámetro DBO₅ cumple a la tercera semana con la norma peruana pero no con las normas extranjeras, pero a los 21 días cumple con la norma mexicana y está cercana a la norma de la Unión Europea. Para el parámetro DQO, a los 21 días se cumple con la norma peruana y la norma de la Unión Europea. Para el parámetro de pH la norma mexicana se cumple a los 21 días, para la norma peruana el pH supera el límite superior a los 21 días. Esto se debe a que las aguas residuales son alcalinas (Metcalf y Eddy, 1995). Para la turbiedad la norma de comparación fue la de Andalucía y el valor es inferior al LMP.

La figura 8 muestra la comparación de diferentes estudios de remoción de carga orgánica (DQO y DBO₅). Rafael (2020) empleo PET Reciclado provenientes de botellas de agua como lecho filtrante en filtro percolador obteniendo remociones de 60.5 y 59.1% de DQO y DBO₅, a una altitud 3824 m.s.n.m., en 15 días. Además, Yucra (2016) empleo PET provenientes de botellas de agua como lecho filtrante y obtuvo remociones de 56.1 y 51.3% para DQO y DBO₅, a una altitud 3840 m.s.n.m., en 39 días. La diferencia que se obtuvo con esta investigación bajo condiciones altoandinas fue por la incorporación del calentamiento solar con colectores solares de bajo costo al sistema del filtro percolador con lecho de PET.

Por otro lado, la figura 8 muestra la comparación con 2 estudios que se realizaron bajo condiciones no altoandinas. Vilchez (2020) emplea PET reciclado como lecho filtrante y obtuvo remociones de 94.9 y 95.2% en DQO y DBO₅, pero a 283 m.s.n.m., en 60 días. El estudio de Jaramillo y Togas (2019) uso piedra pómez como lecho filtrante en un filtro percolador y obtuvo remociones de 96.4 y 98.1% en DQO y DBO₅ a 87 m.s.n.m., en 60 días. Cómo se observa en la figura 8 esta investigación tiene valores de remoción similares a otros estudios bajo condiciones altoandinas.

5 CONCLUSIONES

Se concluye que:

Es factible emplear un prototipo de filtro percolador con lecho filtrante de PET (esponjas, tubo corrugado y tapas de botella) con colector solar de bajo costo para depurar aguas residuales domésticas en condiciones adversas de temperatura como las del altiplano peruano.

El agua residual tratada presenta características típicas de su origen doméstico con alto contenido de DBO₅ y con ratio DBO₅/DQO mayor a 0.4 lo que lo clasifica como agua residual biodegradable.

Las remociones de la DBO y DQO superan el 90 %, y 83% para la turbiedad, demostrando con la prueba “t de student para muestras relacionadas” que la remoción es altamente significativa.

El colector solar de bajo coste tiene un aporte energético de 195.51 KWh, generando 59.4 y 54.4% de energía ahorrada si se considerara las tarifas de costo de Osinerming y Electro Puno en relación a costo de energía solar fotovoltaica de IRENA.

El tratamiento aplicado cumple con los parámetros requeridos en las normas nacionales e internacionales citadas en el artículo, sin excepciones, tanto para DBO₅, DQO, pH y turbiedad.

REFERENCIAS

- Alvarez, P. E. (2009). *Manual de fabricación, en un pequeño taller casero, de un calentador solar con colector de tipo radiador de cobre con termotanque sellado y sin sellar*. Mi calentador solar.
https://micalentadorsolar.com/contenido/pdf/muestra_manual_febero2009.pdf
- APHA AWWA WPCF. (2005). *Métodos Estándar para el examen de aguas y aguas de desecho* (Vol. 1912). <https://cutt.ly/gZZqV6h>
- Barceló, D., Zonja, B., y Ginebreda, A. (2020). Toxicity tests in wastewater y drinking water treatment processes: A complementary assessment tool to be on your radar. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104262.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104262>
- Cao, V., Yang, H., Ndé-Tchoupé, A. I., Hu, R., Gwenzi, W., y Noubactep, C. (2020). Tracing the scientific history of Fe⁰-based environmental remediation prior to the advent of permeable reactive barriers. *Processes*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/PR8080977>
- Cengel, Y., y Boles, M. (2005). Termodinámica. In *Monografía de enseñanza de la Ingeniería Térmica y de fluidos*. <https://cutt.ly/3ZLPb2E>
- Gao, Y., Zhang, H., Peng, C., Lin, Z., Li, D., Lee, C. T., Wu, W. M., y Li, C. (2021). Enhancing nutrient recovery from fish sludge using a modified biological aerated filter with sponge media with extended filtration in aquaponics. *Journal of Cleaner Production*, 320(June), 10. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128804>
- Henze, M. (1992). Caracterización de aguas residuales para modelado de procesos de lodos activados. *Water Science & Technology*, 25, 1–15.
<https://doi.org/10.2166/wst.1992.0110>
- IRENA International Renewable Energy Agency. (2019). *Transformando el sistema energético*-. <https://cutt.ly/RZZwPTu>
- Jaramillo, M. A., y Togas, P. J. (2019). *Evaluación de la eficiencia de un sistema de dos filtros percoladores en serie para el tratamiento de aguas residuales domésticas en la*

- urbanización Santa Lucía – Morales, 2018* [Repositorio UPeU].
<https://cutt.ly/DZLDb3G>
- Juanico, L., y Di Lalla, N. (2013). *Colector solar térmico de muy bajo costo y autoconstrucción universal*. <https://cutt.ly/cNQYpeI>
- Kuntur. (2016, June 8). Estudio de Impacto Ambiental- Sistema de Transporte Andino del Sur. *Andina Agencia Peruana de Noticias*, Anexo B. <https://cutt.ly/dZLFHXc>
- Larios, M. F., González, T. C., y Morales, O. Y. (2015). Aguas residuales y sus consecuencias en el desarrollo en el Perú. *Revista de La Facultad de Ingeniería de La USIL*, 2(1991), 9–25. <https://cutt.ly/rZLGmq3>
- Manzanares, P. F., y Ricaldi, A. A. (2017). *Remoción de materia orgánica de agua residual sintética con filtros aerobios en medio sintético reciclable a escala piloto* [Repositorio de la Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://cutt.ly/mZLG20c>
- Menéndez, G. C., Pérez, O. J., y García, Z. J. (2015). Plantas de tratamiento de aguas residuales. Filtros percoladores. *ResearchGate, January 2013*, 3–54. <https://cutt.ly/0ZLHVSc>
- Metcalf, y Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales. Volumen 1: Tratamiento, vertido y reutilización*. <https://cutt.ly/0ZLHVSc>
- MINAM. (2013). *Línea base ambiental de la cuenca del lago Titicaca*. 85. <https://cutt.ly/sNQWst3>
- MINAM, D. S. N.-2010. (2010, March 17). *Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales*. 1–2. <https://cutt.ly/xZLRE6X>
- Morant, C. J. (2017). *Análisis de las fracciones de DQO en las aguas de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR)* [Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. <https://cutt.ly/yZLJLZt>
- MVCS, Dirección de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2018). *Plan Regional de Saneamiento Puno 2018-2021*. <https://cutt.ly/xZLAJXQ>
- MVCS. (2006). *Norma OS.090. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. i*, 1–65.

<https://cutt.ly/JNQWmgp>

Nandwani, S. (2006). Las aplicaciones productivas y sustentables de la energía solar. In *Universidad Nacional de Costa Rica*. <https://cutt.ly/AZLKk0y>

Noir, J., Azario, R., Cousido, Carlos JRoca Sallefranque, C., y Orcellet, E. E. (2017). Pellets de plásticos reciclados: su utilización como medio de soporte bacteriano en lechos percoladores para tratamiento de aguas residuales industriales. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, 7, 13. <https://cutt.ly/6ZLLgyl>

Noyola, A., Morgan, J., y Guereca, L. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*. <https://cutt.ly/uNQWvgQ>

OSINERGMIN. (2016). La industria de la electricidad en el Perú. In R. T. P. J. Francisco (Ed.), *Perú fuente de energía natural*. Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. <https://cutt.ly/7ZZtV9e>

Palta, P. G., y Morales, V. S. (2013). Fitodepuración de aguas residuales domesticas con poaceas: *Brachiaria mutica*, *Pennisetum purpureum* y *Panicum maximun* en el municipio de Popayán, Cauca. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11(2), 57–65. <https://cutt.ly/KZLZQcn>

Pérez, M. F., Armenteros, O. T., y Hernández, T. J. (2016). Sistema de tratamiento para las aguas residuales en la empresa de aprovechamiento hidráulico Villa Clara. *Revista Centro Azúcar*, 43, 68–75. <https://cutt.ly/UZLSRXQ>

Qian, J., Qu, K., Tian, B., y Zhang, Y. (2021). Water treatment of polluted rivers in cities based on biological filter technology. *Environmental Technology y Innovation*, 23, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101544>

Rafael, R. G. (2020). Influencia del PET reciclado en filtro percolador en el tratamiento secundario de aguas residuales domésticas - San Román, Puno – 2021 [Universidad César Vallejo]. In *Universidad Andina del Cusco*. <https://cutt.ly/NZLM9y5>

Rivera, A., Valdés, P., Castro, R., Nieves, G., y La Torre, V. (1999). Influencia de la recirculación en un sistema de filtro percolador. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 15, 33–39. <https://cutt.ly/IZLCy1U>

- Romero, L. Y., Rojas, O. L., y Rodríguez, M. J. (2017). Evaluación de un filtro percolador sin recirculación con medio de soporte en PVC para el tratamiento de aguas residuales combinadas (domésticas y pecuarias). *I+D Revista de Investigaciones*, 9(1), 38–48. <https://doi.org/https://doi.org/10.33304/revinv.v09n1-2017004>
- Rossi, M. (2010). Oportunidades de mejoras ambientales por el tratamiento de aguas residuales en el Perú. In *Fondo Nacional del Ambiente*. <https://cutt.ly/2NQWjDI>
- Salcedo, C. V. (2011). *Influencia del estudio de la tecnología de vacío en tubos sobre la eficiencia para el calentamiento de agua usado energía solar* [Universidad Técnica de Ambato]. <https://cutt.ly/4ZLVa6T>
- Sánchez, P. R., y García, G. K. (2018). Tratamiento de aguas residuales de cargas industriales con oxidación avanzada en sistemas convencionales. *La Granja: Revista de La Ciencias de La Vida*, 27(1), 103–111. <https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.08>
- SUNASS. (2022). *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el ámbito de las empresas prestadoras 2022*. <https://cutt.ly/ENQE09p>
- Trapote Jaime, A. (2011). *Depuración de aguas residuales urbanas*. <https://cutt.ly/9Mekp6c>
- UNESCO. (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017: Aguas Residuales, el recurso desaprovechado. In *Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura*. <https://cutt.ly/HZLVAmv>
- Vásquez, T. A., Aguinada, M. E., Zegarra, R. A., y Timaná, T. F. (2013). *Propuesta de mejora de tratamiento de aguas residuales en una empresa pesquera*. <https://cutt.ly/pZLBwnf>
- Vigo Rivera, J. E. (2020). *Efecto de Microorganismos Eficaces (ME) en el proceso de depuración de aguas residuales domésticas en condiciones altoandinas*. Universidad Peruana Unión.
- Vilchez, T. R. (2020). Eficiencia del uso de plástico PET en IVilchez, T. R. (2020). Eficiencia del uso de plástico PET en los filtros biológicos paratratamiento de aguas residuales domésticas del Asentamiento Humano 09 de Octubre – Comas [Universidad

César Vallejo]. In Universi [Universidad César Vallejo]. In *Universidad César Vallejo*.
<https://cutt.ly/IZLB9ct>

Yang, H., Rui, H., Ndé-Tchoupé, A. I., Gwenzi, W., y Ruppert, H. (2020). Designing the Next Generation of Fe^o -Based Filters for Decentralized Safe Drinking Water Treatment: A Conceptual Framework. *Processes*, 8(Junio), 6–9.
<https://doi.org/10.3390/pr8060745>

Yucra, Y. R. (2016). *Influencia del PET Reciclado en las características del agua residual doméstica mediante el proceso de filtro percolador para el Distrito de Taraco, Provincia de Huancané, Región Puno* [Repositorio de la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez]. <https://cutt.ly/tZLMxt7>

ANEXOS

6.1 Evidencia de Sumisión

