



Diseño de un sistema físico-químico compacto y sostenible para potabilizar aguas superficiales en zonas remotas de Arequipa-Perú

Design of a compact and sustainable physical-chemical system for drinking surface waters in remote areas of Arequipa-Perú

Romel Gordillo Pinto*, José Alberto Aguilar Franco

Universidad Católica San Pablo. Instituto de Energía y Medio Ambiente. Arequipa, Perú.
*rgordillo@ucsp.edu.pe

(*recibido/received: 13-noviembre-2021; aceptado/accepted: 15-enero-2022*)

RESUMEN

Un sistema de tratamiento físico-químico para aguas superficiales ha sido diseñado y fabricado para dotar de agua potable a zonas alejadas que no tienen acceso al servicio básico. El sistema consta de cuatro unidades principales; la primera: de pre-tratamiento, filtra las partículas y sedimentos presentes en el agua de una fuente superficial cercana; la segunda unidad: de tratamiento primario; dosifica insumos químicos para coagulación y generación de flóculos para sedimentar las partículas a manera de lodos y retirarlas posteriormente; la tercera unidad de tratamiento secundario; filtra las partículas y agentes microbianos o patógenos de tamaño microscópico y se realiza la cloración al agua para dotar de la calidad potable requerida según normativa. La cuarta unidad, de generación energética; aprovecha la radiación solar y la convierte en energía eléctrica para que los equipos operen de forma adecuada. Los resultados indican que es factible la implementación del sistema propuesto para dotar de agua apta para el consumo humano y en cumplimiento de los estándares de la normativa nacional vigente destinada principalmente para comunidades vulnerables.

Palabras claves: tratamiento físico-químico, agua superficial, potabilización, sostenible, radiación solar.

ABSTRACT

A physicochemical treatment system for surface water has been designed and manufactured to provide drinking water to remote areas that do not have access to basic service. The system consists of four main units; the first: pre-treatment, it filters the particles and sediments present in the water from a nearby surface source; the second unit: primary treatment; doses chemical inputs for coagulation and generation of flocs to sediment the particles as sludge and remove them later; the third secondary treatment unit; Filters microscopic particles and microbial or pathogenic agents and water is chlorinated to provide the required drinking quality according to regulations. The fourth unit, energy generation; It takes advantage of solar radiation and converts it into electrical energy so that the equipment operates properly. The results indicate that it is feasible to implement the proposed system to provide water suitable for human and in compliance with the standards of the current national regulations intended mainly for vulnerable communities.

Keywords: physical-chemical treatment, surface water, purification, sustainable, solar radiation.

1. INTRODUCCIÓN

El acceso al servicio del agua potable es un pilar fundamental para la preservación de la salud. Acceder a una red de agua potable es un asunto muy importante en relación a la salubridad y desarrollo de los pueblos; hay localidades alejadas que por motivos económicos, geográficos y sociales no cuentan con este servicio básico. Está comprobado que inversiones en sistemas de abastecimiento de agua potable resulta rentable desde el punto de vista económico ya que la reducción de los costos por atención en temas de salud cuando se tiene acceso al agua potable se reduce. Las acciones necesarias para implementar redes y/o sistemas de abastecimiento de agua potable tienen efectos positivos que demuestran que los principales beneficiados son las personas pobres tanto de zonas rurales como de zonas urbanas, se trata de una estrategia potente, accesible y altamente eficaz de mitigación de la pobreza. (Organización Mundial de la Salud, 2006). En todo el mundo, se cuenta con diversas fuentes naturales de agua de manera superficial y del subsuelo; así como diversos métodos para la potabilización de la misma, desde métodos empíricos hasta procesamiento a escala industrial (Korkusuz, et al., 2004); entre estos métodos que destacan está el tratamiento físico-químico, el cual consiste en la captación de los microorganismos, partículas e impurezas a través de sustancias químicas coagulantes y floculantes a partir de la formación de flóculos (Liang, et al., 2007), los cuales por acción de la gravedad son sedimentados para ser posteriormente retirados, en este tipo de tratamientos, la coagulación es una etapa vital y se debe principalmente a la correcta selección de los insumos químicos a utilizar y a la realización de una prueba de jarras de las aguas a tratar, seguidamente por métodos de filtración según sea su turbidez de salida para pasar posteriormente por una etapa de cloración y de esta manera dotar a la misma de la calidad para que sea apta para el consumo humano. (Guzmán, et al., 2013) y (Arque, 2014). El uso de los insumos químicos debe ser controlado y calculado, para que la potabilización sea eficiente y segura para los consumidores, evitando daños a la salud o intoxicación por exceso en el uso de insumos asociados al aluminio y cloro. (Krewski et al., 2007).

El uso y aplicación de energías renovables está garantizado en el presente diseño ya que se aprovecha la radiación solar disponible de la zona sur del Perú donde se alcanzan valores superiores a los 1000W/m², en pocas partes del mundo se experimenta la presencia de estos valores de radiación por lo que resulta viable (SENAMHI, 2003). Las empresas y/o entidades que distribuyen el recurso hídrico potabilizado, mediante su red e infraestructura, constantemente monitorean la calidad a través de análisis y caracterizaciones, pero a pesar de ello y de la gran cobertura aún existen zonas alejadas que no cuentan con este servicio de potabilización de agua o con el que cuentan es deficiente; este porcentaje de población que no cuenta con acceso al agua potable se ubica principalmente en las alturas, sierra y zonas alejadas que por diversos motivos no tienen acceso a la red de distribución del agua potable (Arque, 2014) y (SUNASS, 2004). Para alcanzar los niveles de calidad en el agua tratada existen diversos tipos de tratamiento de aguas superficiales, algunos sistemas bastante eficientes aún con presencia de metales pesados (Argota-Pérez, Argota-Coello, & Iannacone, 2016), siendo el tratamiento físico-químico el escogido dada su alta eficacia e integración con la necesidad de las comunidades descritas.

2. METODOLOGÍA

El diseño y desarrollo del sistema de tratamiento propuesto contempla algunas consideraciones a tomar en cuenta previo a su implementación; debe presentar un espacio disponible techado de 90 m² aproximadamente, la superficie debe ser de concreto para realizar la distribución del sistema y, de los tanques de agua de ingreso y almacenamiento, el sistema potabilizador se debe ubicar a una distancia no mayor de 40 metros lineales a la fuente de agua superficial. El sistema piloto desarrollado está diseñado para abastecer a un máximo de 80 familias o 400 personas con una capacidad de tratamiento de 10m³/h; se requiere de 02 personas de apoyo para las actividades de operación, mantenimiento y vigilancia.

2.1. Sistema Potabilizador de Agua:

En la siguiente tabla se presentan las características principales a manera de ficha técnica:

Tabla 1. Características técnicas principales del sistema.

Ficha técnica	
Tipo de tratamiento	Físico-químico
Horas diarias de trabajo	4.5h. efectivas
Dimensiones generales	4.00x2.50m.
Volumen de cámaras	3.34m ³
Capacidad de tratamiento	10 m ³ /h
Área de instalación	90 m ²
Tipo de agua de ingreso	Aguas superficiales
Estructura	Metálica
Revestimiento	Fibra de vidrio
Alimentación energética	Solar fotovoltaica

Fuente: Creación de los autores

2.2. Unidades constitutivas:

Unidad de Pre-tratamiento. Esta unidad dota de agua superficial a las cámaras de tratamiento; capta el agua superficial y evita el ingreso de partículas a manera de basura, restos de vegetación, sedimentos, restos de animales, etc., con una duración de 5-10 minutos; seguidamente, el recurso hídrico ingresa a la primera cámara para iniciar con el tratamiento de coagulación-floculación. Se tendrá un tipo de succión negativa con cotas que oscilan entre 3 y 20 metros, según la naturaleza de la fuente disponible de agua.

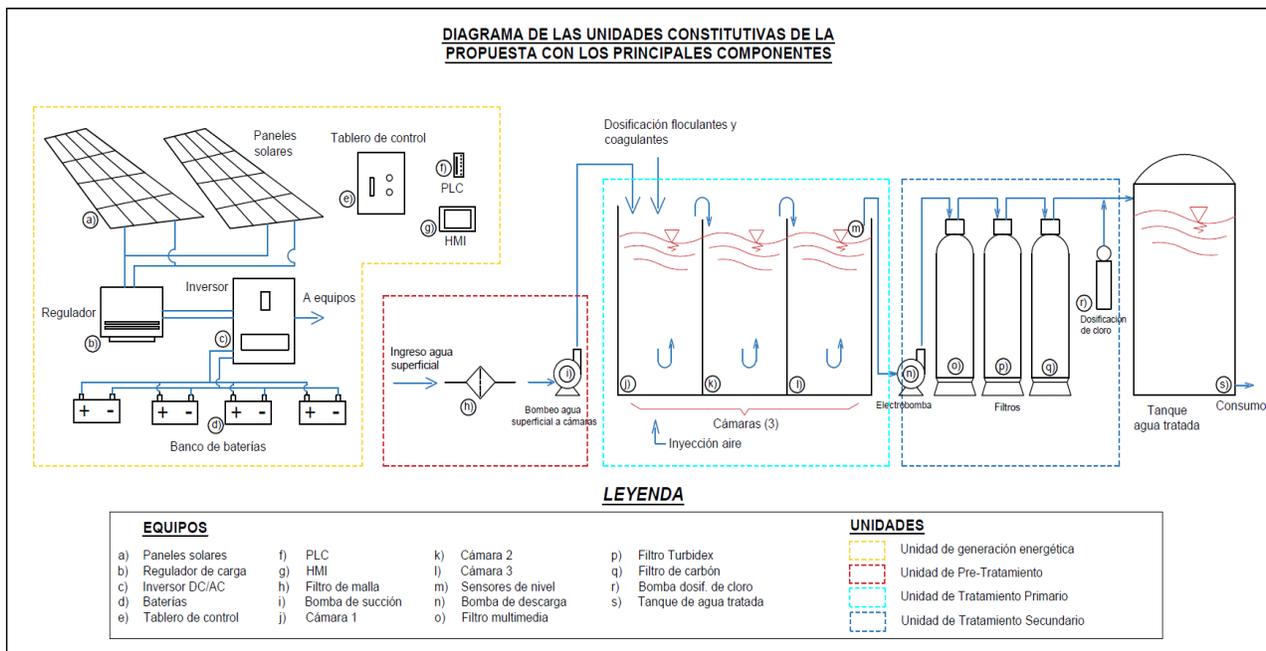


Figura 1. Unidades constitutivas del sistema de tratamiento de aguas.

Fuente: Creación de los autores

Unidad de Tratamiento Primario. Esta unidad realiza el tratamiento físico-químico de coagulación-floculación; el agua superficial ingresa a la cámara de sedimentación donde se efectúa la dosificación de 2 productos químicos: en primer lugar; el coagulante que se encarga de agrupar las partículas que se van retirar y el floculante, logrará la generación de “flocs” y por su peso se sedimentarán y ubicarán en la base de la cámara, para limpieza y mantenimiento periódico de estos sedimentos. La dosificación de químicos es directamente proporcional al caudal con el cual ingresa el agua a la unidad de tratamiento y los NTU

(Unidades Nefelométricas de Turbidez) de la misma; lo recomendado es realizar una prueba de jarras in situ para tener una dosificación exacta; muchas veces la calidad del agua es cambiante en períodos cortos de tiempo, lo que demandaría realizar pruebas de jarras constantemente; y esto no resultaría viable económicamente; por lo tanto, como insumos estandarizados para la zona estudiada se utilizará policloruro de aluminio como coagulante y polímero aniónico MSFLOC630 como floculante. El agua en este punto está en el rango de los 25-40 NTU y el proceso tiene una duración entre 30-45 minutos.

Unidad de Tratamiento Secundario. Se realiza un filtrado profundo y retención de partículas de tamaño de 5 micras; el agua de salida de las cámaras de coagulación-floculación es bombeada y pasa por la línea de filtrado para garantizar que la turbidez de salida sea inferior a 0.1 NTU, además el agua de salida debe adquirir propiedades organolépticas como: olor, color y sabor característicos del recurso hídrico potable. Los 3 filtros se disponen en serie, poseen válvulas al ingreso y salida. El tiempo que el agua demora en pasar por los 3 elementos filtrantes es entre 15-20 minutos; ingresa a la zona de filtros con una turbidez superior a los 40NTU y a su salida se debe tener una turbidez menor a 0.1NTU. Seguidamente el agua pasa por la etapa de desinfección donde se dosifica cloro en línea hasta alcanzar los estándares de la normativa vigente. Cabe destacar que; el tiempo de tratamiento por cada 10 metros cúbicos de agua será de 01 hora.

Unidad de Alimentación Energética. Esta unidad dota de energía eléctrica a los equipos de las unidades del sistema de potabilización; capta radiación solar, la convierte en corriente alterna, adecúa y estabiliza la señal de la misma con el objetivo de energizar a los componentes. Cabe destacar que la generación de energía puede ser utilizada inmediatamente en horas con radiación solar apropiada o almacenada para lograr el funcionamiento del sistema en horario nocturno o de madrugada, según se requiera.

2.3. Procedimiento Experimental del Sistema:

El sistema potabilizador trata aguas tipo superficial, ya que estos cuerpos de aguas se encuentran a manera de lagos, lagunas, ríos y riachuelos; además, el acceso a estas fuentes de recurso hídrico es de baja complejidad. Para fines de muestreo se recopiló agua superficial de un riachuelo ubicado en el distrito de Sogay en la provincia de Arequipa (Perú); el procedimiento para la toma de muestras se realizó siguiendo los estándares y protocolos recomendados por normativa internacional de la ASTM (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales), y métodos estandarizados de laboratorio para análisis de aguas (SMEWW-APHA-AWWA-WEF). Las muestras fueron analizadas según estándares de la normativa vigente que ordenan los estándares de calidad ambiental para el agua del Decreto Supremo (D.S.) N°004 del Ministerio del Ambiente (MINAM) del Perú, para aguas superficiales.



Figura 2. Riachuelo del distrito de Sogay, Arequipa.

Fuente: Propia de los autores

La Tabla 2 presenta los parámetros estudiados entre los principales: demanda química de oxígeno, físico-químico, cianuro total, ensayos microbiológicos, de *Vibrio Cholerae*, organismos de vida libre, demanda biológica de oxígeno, oxígeno disuelto, aceites, grasas y de fenoles. Se han identificado los parámetros que superan los Límites Máximos Permisibles (LMP), según el D.S. N°004 MINAM que regula los estándares para el agua potable en el Perú; potencial de hidrógeno (pH), coliformes, *Escherichia coli*, algas, protozoarios y copépodos (filas 5, 20, 22 y 25 de la Tabla 2); estos parámetros son físico-químicos,

microbiológicos y parasitológicos, los mismos que se reducen con el tratamiento propuesto ya que los coagulantes y floculantes seleccionados son idóneos para este tipo de solución. Estos parámetros se presentan debido a que el agua recolectada es superficial lítica, de un riachuelo; la cual se encuentra en movimiento, con vegetación, restos de animales y desechos orgánicos naturales. En cuanto a los parámetros inorgánicos (uranio, arsénico, plomo, fierro, boro, antimonio, etc.) ninguno sobrepasa los valores permisibles.

Tabla 2. Principales parámetros obtenidos del análisis de laboratorio y parámetros a reducir según Límites máximos permisibles (LMP).

Parámetros	Unidad	Resultado según análisis	Límite Máximo Permissible (LMP)	Aceptable
Nitrógeno amoniacal	mg/L	0.192	Menor a 1.5	SI
Material flotante	Presencia o Ausencia	Ausencia	Ausencia	SI
Color	Pt Co	10	Menor a 15	SI
pH	Escala pH	8.82	6.5-8.5	NO
Turbidez	NTU	3	Menor a 5	SI
Dureza Total	mg/L	275	Menos a 500	SI
Oxígeno disuelto	mg/L	7.6	Mayor a 6	SI
Sólidos disueltos	mg/L	570	Menor a 1000	SI
Sulfato	mg/L	125.1	Menor a 250	SI
Aceites y grasas	mg/L	0.32	Menor a 0.5	SI
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	0.5	Menor a 3	SI
Demanda química de oxígeno	mg/L	7.9	Menor a 10	SI
Fenoles	mg/L	0.002	Menor a 0.003	SI
Arsénico	mg/L	0.0072	Menor a 0.01	SI
Mercurio	mg/L	0.00041	Menor a 0.001	SI
Fierro	mg/L	0.045	Menor a 0.3	SI
Plomo	mg/L	0.0026	Menor a 0.01	SI
Antimonio	mg/L	0.00049	Menor a 0.02	SI
Coliformes total	NMP/100mL	540	Menor a 50	NO
Coliformes Fecal	NMP/100mL	13	Menor a 20	SI
E. Coli	NMP/100mL	13	0	NO
Vibrio cholerae	Presencia o Ausencia	Ausencia	Ausencia	SI
Helminfos patógenos	N°/L	0	0	SI
Algas, protozoarios y copépodos	N°/L	17000	0	NO
Protozoarios patógenos	N°/L	0	0	SI

Fuente: Extraído de análisis de laboratorio, según normativa de los Estándares de calidad ambiental para agua del D.S. N°004 MINAM – Laboratorios Analíticos del Sur.

Las unidades constitutivas del sistema potabilizador tienen una función específica que, al integrarse conforman un sistema para potabilizar el agua superficial; la operación para el correcto funcionamiento del sistema demanda que; cuando se disponga de radiación solar disponible se carguen las baterías, se activen los equipos electrónicos (PLC, HMI, Controlador e inversor), luego en la Unidad de Pre-tratamiento se acciona la bomba centrífuga que acopia el agua superficial desde su fuente natural hasta el ingreso a la primera cámara de tratamiento, el agua es filtrada de sólidos de tamaño visible y el filtro se limpiará según inspección visual.

Seguidamente en la Unidad de Tratamiento Primario, los dosificadores de coagulante y floculante son accionados eléctricamente en el tiempo y cantidad programados en el PLC (Programador Lógico Controlable), el agua es clarificada y tratada con insumos químicos por efecto de coagulación-floculación, se retiran impurezas y partículas de tamaño microscópico que se acumulan en la base como lodo, siendo luego retirado según evaluación semanal. En la Unidad de Tratamiento Secundario se obtiene el recurso hídrico para el consumo humano; los filtros en línea, así como el dosificador de cloro serán accionados según el caudal del agua y la prueba de jarras, para el caso de los filtros y dosificador de cloro se realizará mantenimiento basado en la condición. El agua ya es potable y cumple con los estándares de salubridad requeridos. Para la correcta implementación del sistema de tratamiento potabilizador y su preservación en el tiempo, es necesario diseñar y fabricar las unidades constitutivas con las dimensiones (4.00m de largo x 2.40m. de ancho), materiales idóneos (metal, plástico y fibra de vidrio) y distribución, tal como se muestra en la siguiente figura N°3.

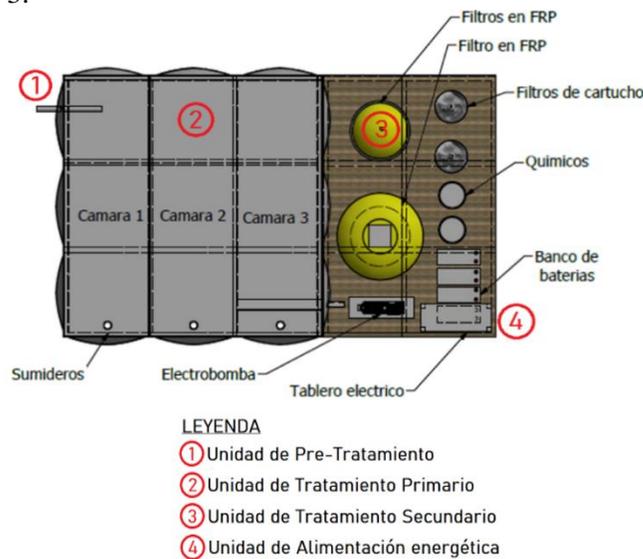


Figura 3. Vista superior de la distribución de los componentes principales en las unidades constitutivas.

Fuente: Creación de los autores

La construcción del sistema inicia con el dimensionamiento y fabricación de la estructura metálica, que soporta la masa de las cámaras, agua a tratar, componentes y equipos del sistema potabilizador. La estructura de la base y soportes son metálicos para brindar rigidez y seguridad; se distribuyen todas las unidades constitutivas, que están relacionadas entre sí, para optimizar el funcionamiento integral del sistema. Los tanques de tratamiento y los porta-filtros serán fabricados en fibra de vidrio; estos componentes serán cubiertos con pintura epóxica para evitar daños y deterioro por oxidación o condiciones climáticas. Para el caso de los componentes eléctricos: tablero de control, baterías, inversor, entre otros, están ubicados estratégicamente para cumplir su función y para que los mismos se encuentren protegidos ante fuerzas externas. La distribución mencionada se puede apreciar en la figura N°3, donde se aprecia una vista superior.

2.4. Equipamiento:

El proceso para la potabilización inicia con la captación de agua superficial en la unidad de pre-tratamiento a través de un filtro de aspiración construido en material ABS y acero inoxidable de la marca Filtromatic, que evita el ingreso de partículas de dimensiones considerables (0.5-1.5+mm.) para preservar el estado de la bomba, asegurar su correcto funcionamiento y evitar paradas por mantenimiento correctivo. Las bombas centrífugas son de la marca Hidrostral de 1.4HP; para succión y descarga. Para dotar al sistema del aire, se cuenta con un soplador ubicado en la unidad de tratamiento primario, que provee de

oxígeno a los tanques para mantener la mezcla en una condición mixta, su selección está en función de la potencia de la bomba de alimentación (20-40%); se utilizó un soplador de 400W de la marca Motorex. En las cámaras se ubican sensores de nivel; de la marca Kossodo, trabajan con un interruptor de contacto, y por el movimiento del flotador se abre o cierra el contacto eléctrico. Los insumos químicos ingresan al sistema a través del dosificador de coagulantes y floculantes, este componente se ubica en la unidad de tratamiento primario (etapa de mezcla en las cámaras), aquí dosifica la cantidad necesaria (según prueba de jarras realizada in situ); son de la marca Merinsac. Las etapas de filtrado inician con el filtro multimedia de la marca Merinsac, con velocidad de filtración de 5 - 17gpm/ft; este componente se encuentra en la unidad de tratamiento secundario; capta óxidos, arenilla, elementos orgánicos y sedimentos de hasta 15 micrones; los medios filtrantes internos de este equipo son: antracita, arena, garnet y grava; los mismos que se pueden retro-lavar.

La filtración se optimiza con el filtro Turbidex de la marca HidroWater, en la unidad de tratamiento secundario; permite un filtrado más profundo, reteniendo partículas de 3-5 micrones, los elementos filtrantes de este componente son gránulos absorbentes de aluminosilicato; se opta por su instalación para no saturar a los filtros multimedia y de carbón, así mismo se podrá trabajar con la velocidad de tratamiento de diseño. La filtración concluye en el filtro de carbón activado de la marca Merinsac, que se encuentra en la unidad de tratamiento secundario; las partículas diminutas se adhieren a los pequeños poros del carbón; este filtro “pulidor” quita el mal olor, color y sabor del agua ya tratada. Finalizada la etapa de filtración, el agua continua a través del dosificador de cloro de la marca AstralPool, serie Dossi-5; se encuentra ubicado en la Unidad de tratamiento secundario, aquí dosificará 755.56 gramos por cada 10 m3 de agua.

El PLC S7 300 y HMI KTP400 de la marca Siemens, son equipos de control de la unidad de alimentación energética; se realiza la programación y control en tiempo real de las variables principales: niveles, potencial de hidrógeno y tiempos de tratamiento. Para lograr una autonomía de 1.5 días se contarán con 4 baterías de la marca Otaru de 150 Ah., para lograr la conversión de radiación solar en energía eléctrica se contará con paneles solares poli-cristalinos de 325Wp. El sistema potabilizador cuenta con un controlador de carga como elemento de seguridad y un inversor de marca Cosuper, que tiene como función convertir la energía eléctrica de entrada y adecuarla al voltaje según requieran los equipos eléctricos (220V o 12V). Dado que la potencia de arranque del sistema es de 9520 W, el inversor debe ser de al menos 10 kW. Los componentes descritos se ubican en un tablero eléctrico de control con grado de protección IP 55, con llaves termomagnéticas y diferencial, los mismos que deben soportar corrientes superiores a los 52.28A (corriente máxima calculada).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio, los mismos que respaldan al prototipo mostrado como una opción viable para dotar de agua apta para el consumo humano en zonas rurales alejadas, son: validación de parámetros del agua tratada, prototipo tecnológico de potabilización de aguas superficiales, consumos específicos de insumos químicos y energía y, análisis económico del prototipo.

3.1. Validación de parámetros del agua tratada:

El agua recopilada fue tratada en el sistema diseñado, el cual fue implementado con el apoyo de la empresa Serviman Perú SRL, en la localidad de Socabaya, Arequipa-Perú. Dicho tratamiento fue para un volumen de agua de 10 metros cúbicos en un tiempo de 62 minutos. El agua tratada fue analizada a detalle en Laboratorios Analíticos del Sur (LAS) en la ciudad de Arequipa, bajo el Reglamento de la calidad de agua para consumo humano DS 031-2010 SA DIGESA, obteniendo los valores mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros obtenidos del análisis de laboratorio del agua tratada.

Elemento	Unidad de medida	Resultado según análisis	Límite Máximo Permisible	Aceptable
----------	------------------	--------------------------	--------------------------	-----------

Calidad Organoléptica				
Aluminio	mg/L	0,033	≤ 0,2	SI
Cobre	mg/L	0,0124	≤ 2,0	SI
Fierro	mg/L	0,092	≤ 0,3	SI
Manganeso	mg/L	0,00354	≤ 0,4	SI
Sodio	mg/L	1,60	≤ 200	SI
Zinc	mg/L	0,0118	≤ 3,0	SI
Olor	Factor dilución a 25°C	ACEPTABLE	ACEPTABLE	SI
Sabor	Sin unidad	ACEPTABLE	ACEPTABLE	SI
Color	Pt Co	a < 2	≤ 15	SI
Conductividad eléctrica	mS/cm	0,184	≤ 1,5	SI
pH	Unidad de pH	7,26	6,5 a 8,5	SI
Turbidez	NTU	a < 0.50	≤ 5	SI
Cloruros	mg/L	12,3	≤ 250	SI
Dureza total CaCO3	mg/L	47,8	≤ 500	SI
Sólidos disueltos	mg/L	107	≤ 1000	SI
Sulfato	mg/L	20,02	≤ 250	SI
Inorgánico				
Uranio	mg/L	b < 0,0005	≤ 0,015	SI
Arsénico	mg/L	0,0016	≤ 0,010	SI
Mercurio	mg/L	0,00040	≤ 0,001	SI
Boro	mg/L	0,0934	≤ 1,500	SI
Bario	mg/L	0,02220	≤ 0,700	SI
Cadmio	mg/L	b < 0,00011	≤ 0,003	SI
Cromo	mg/L	b < 0,00039	≤ 0,050	SI
Molibdeno	mg/L	0,00047	≤ 0,07	SI
Niquel	mg/L	0,00078	≤ 0,020	SI
Plomo	mg/L	0,0050	≤ 0,010	SI
Antimonio	mg/L	b < 0,00049	≤ 0,020	SI
Selenio	mg/L	0,0040	≤ 0,010	SI
Cianuro total	mg/L	a < 0,0050	≤ 0,070	SI
Cloro Cl2	mg/L	0,77	0,5 a 5	SI
Fluoruros	mg/L	0,26	≤ 1,000	SI
Nitrato	mg/L	4,15	≤ 50,00	SI
Nitrito	mg/L	a < 0,004	≤ 0,20	SI
Microbiológicos y parasitológicos				
Bacterias heterotróficas	UFC/mL	< 1	≤ 500	SI
Coliformes totales	NMP/100 mL	< 1,1	≤ 1,8	SI
E. Coli	NMP/100 mL	< 1,1	≤ 1,8	SI
Helmintos patógenos	N°/L	0	≤ 0	SI
Algas, protozoarios y copépodos	N°/L	0	≤ 0	SI
Protozoarios patógenos	N°/L	0	≤ 0	SI
Orgánicos				

Aceites y grasas	mg/L	$b < 0,32$	$\leq 0,5$	SI
------------------	------	------------	------------	----

Fuente: Extraído del análisis de laboratorio para el agua tratada – Laboratorios Analíticos del Sur.

Según resultados del análisis de laboratorio, se puede evidenciar y afirmar que los parámetros de calidad organoléptica, elementos orgánicos e inorgánicos, parámetros microbiológicos y parasitológicos, cumplen con los límites máximos permisibles de la normativa peruana vigente para la calidad de agua potable.

3.2. Sistema para la potabilización de aguas superficiales:

Se ha desarrollado e implementado un prototipo para la potabilización de agua superficial caracterizado por ser portátil, compacto, eco-amigable, sostenible, fácilmente adaptable y replicable. La figura N°4, presenta una vista lateral del diseño del prototipo con los componentes principales, siguiendo la secuencia de tratamiento a partir de las unidades constitutivas diseñadas; de esta manera se aprovecha y optimiza el espacio disponible, que en algunos casos es reducido, dada la geografía accidentada y difícil acceso de algunas localidades.

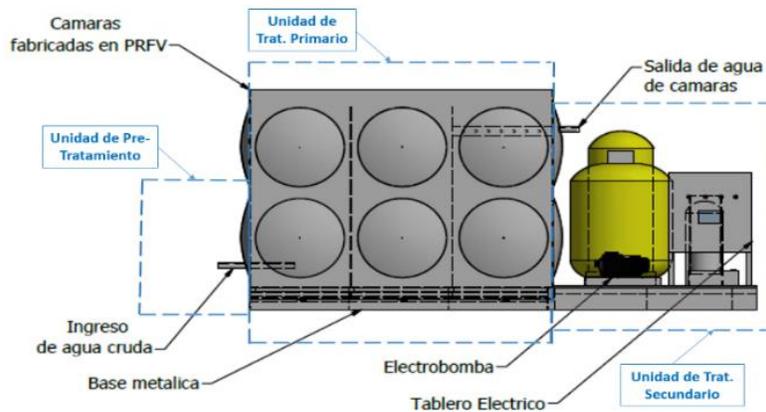


Figura 4. Vista lateral y distribución de componentes principales.

Fuente: Creación de los autores

En la figura 5; vista isométrica de las unidades del prototipo, se presentan las cámaras de tratamiento, con volumen total de 10m³., la distribución de los tanques de dosificación, filtros en línea y equipos de alimentación energética; se tiene un sistema compacto. El prototipo se puede replicar y acoplar de manera modular para cumplir con requerimientos superiores a los 10m³/h. Es portátil, dada la facilidad de montaje, desmontaje, acoplamiento y transporte de un punto a otro en períodos cortos de tiempo, debido que el espacio que ocupa es pequeño: área de 40 m² y altura de 3.5 m. Las características mencionadas permiten una buena mantenibilidad y fácil operación, también es eco-amigable ya que utiliza paneles solares y equipamiento solar fotovoltaico; con el uso de estos componentes no es necesario utilizar energía eléctrica convencional o quema de combustibles fósiles; así se contribuye a la conservación del medio ambiente.

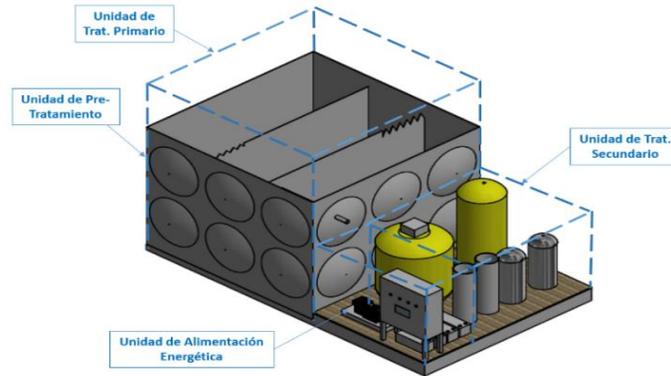


Figura 5. Vista isométrica y distribución de unidades.

Fuente: Creación de los autores

En la figura 6; vista isométrica del prototipo de potabilización. Se destaca la distribución de los paneles solares y componentes fotovoltaicos los cuales captan la radiación solar, generan, adecúan y distribuyen la energía eléctrica a los equipos de control (PLC y HMI) y regulación (inversor y controlador) para el correcto funcionamiento del sistema potabilizador. Se alcanza un gran ahorro al aprovechar la radiación solar; evitando quemar combustibles fósiles, además de otorgar al prototipo la característica de ser eco-amigable. Se cuenta con un tanque de almacenamiento (de fibra de vidrio) portátil; con una durabilidad mínima de 20 años; se puede dimensionar y fabricar de acuerdo a la necesidad específica del lugar de captación.

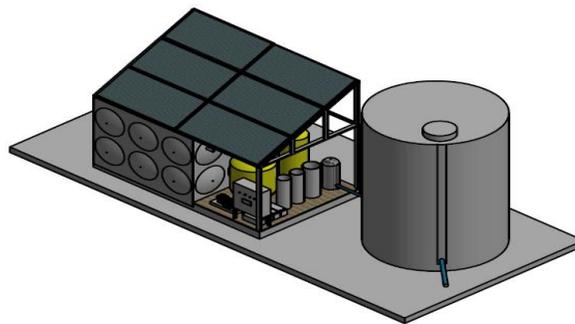


Figura 6. Vista isométrica del prototipo.

Fuente: Creación de los autores

La figura 7 presenta el prototipo construido; se respetaron las dimensiones generales, materiales, especificaciones técnicas de equipos, así como insumos químicos a utilizar los mismos que fueron calculados y seleccionados según bibliografía y recomendación de proveedores de probada trayectoria.



Figura 7. Fotografías del prototipo listo para potabilizar.

Fuente: Creación de los autores

La Tabla 3, presenta una ficha resumen del prototipo; se aprecian las características principales de dimensiones, insumos químicos a utilizar, tiempo de tratamiento, materiales, entre otros.

Tabla 3. Ficha técnica resumen del sistema.

Ficha Técnica	
Capacidad de producción	40-45 m ³ (agua potable)
Dimensiones (l. x a. x h.)	4.00 x 10.00 x 3.50 (metros)
Máxima producción por hora	10 m ³ (3 litros/segundo)
Energía eléctrica	Obtenida por radiación solar captada de paneles solares fotovoltaicos
Instalación y distribución	Diseño modular, fácilmente montable-desmontable
Mantenimiento	Basado en la calidad cambiante del agua, condición e inspección diaria. <i>Mínimo después de 3 días de operación.</i>
Público objetivo	Pobladores de zonas rurales y empresas alejadas
Normativa	DS N°004 MINAM - Perú
Coagulante	Policloruro de aluminio
Floculante	Sifloc 120CL
Cloración	HTH granular

Fuente: Creación de los autores

3.3. Insumos químicos seleccionados:

El consumo de agua por persona es de 100 litros diarios (según OMS), y la capacidad máxima de tratamiento del sistema es de 10 m³/h. Se han identificado la cantidad y los insumos químicos necesarios; coagulante (policloruro de aluminio) que elimina las cargas negativas de las partículas presentes en el agua superficial y evita que se repelan entre sí. El floculante (aniónico Sifloc 120CL) induce a las partículas de la mezcla coagulante-agua para que choquen entre sí y formen flóculos que se puedan retirar con facilidad. El hipoclorito cálcico granular (HTH) desinfecta el agua (luego de la filtración); estos insumos químicos son los seleccionados para la potabilización de aguas superficiales según casos de éxito, investigaciones y bibliografía relacionada a sistemas de potabilización de aguas en la región. La dosificación recomendada es brindada por los fabricantes de insumos químicos y proveedores; lo ideal es realizar pruebas de jarras con el agua del lugar y según la calidad de la misma, calcular una dosificación específica. En la tabla N°4, se aprecia la cantidad diaria y mensual de los insumos químicos necesarios, información fundada desde una base de cálculo de dosificación por litro de: 50mg, para el coagulante; 0.5mg de floculante y 0.0755.56g, de agente para cloración. Según la información de dosificación y costos de la Tabla N°4, para tratar 1 metro cúbico de agua se incurre en costos (insumos químicos) de PEN=1.30 ó USD=0.33. Teniendo en cuenta las limitaciones horarias de tratamiento; el costo mensual por químicos es de PEN=1747.19 / USD=436.79.

Tabla 4. Cantidad y costo de insumos químicos a utilizar por mes de trabajo.

Insumo químico	Dosificación diaria	Dosificación por mes	Total (PEN)
Policloruro de aluminio	50 mg/l = 2.25kg.	58.5 kg.	234.00
Floculante aniónico, Sifloc 120CL	0.5 mg/l = 22.5kg.	0.585 kg.	10.39
Cloro HTH granular	755.56 g/10m ³ = 3.4kg.	88.4 kg.	1502.80
			1747.19

Fuente: Creación de los autores

3.4. Resumen de costos:

El prototipo potabilizador presenta 3 tipos de costos: 1. Equipos que fueron identificados y calculados en base a parámetros de diseño; volumen de cámaras, capacidad de tratamiento y tiempo de funcionamiento (PLC, HMI, bombas centrífugas, paneles, inversor, dosificadores, filtros, etc.); 2. Materiales (planchas metálicas, fibra de vidrio, pernos, etc.) y 3. Servicios para la fabricación, instalación y puesta en marcha (instalaciones eléctricas, hidráulicas, etc.) En la tabla N°5 se presenta el resumen de costos para la fabricación del prototipo, se destaca que la propuesta es viable en un mediano plazo, puede ser adquirida por entidades estatales, empresas privadas y asociaciones de grupos humanos.

Tabla 5. Resumen de costos para la fabricación del prototipo.

Costo	Monto en Soles (PEN)
Equipamiento	31,879.99
Materiales	12,832.50
Servicios	4,200.00
Total	48,912.49

Fuente: Creación de los autores

3.5. Consumo energético

El prototipo potabilizador tiene componentes que presentan un consumo de 11809.5Wh, según las 4.5 horas de funcionamiento, cantidad de componentes y potencia requerida por los mismos; tal como se muestra en la tabla N°6. El sistema aprovecha la radiación solar y la convierte en energía eléctrica, cuenta con respaldo de un banco de baterías para emergencias y la posibilidad de ser alimentado de manera externa cuando las condiciones climáticas no abastezcan la energía requerida.

Tabla 6. Consumo energético de los componentes eléctricos del prototipo.

Equipo	Cant.	Potencia (W)	Pot. Total (W)	Horas (h)	Consumo (Wh)	Potencia (W)
Bomba 1.4 HP	2	1044	2088	4.5	9396	8352
Blower	1	355	400	4.5	1600	400
PLC	1	8	8	4.5	36	8
HMI	1	5	5	4.5	22.5	5
Sensores de nivel	6	5	30	4.5	135	135
Inversor eléctrico	1	50	50	4.5	225	225
Controlador de bombeo	1	50	50	4.5	225	225
Dosificador cloro	1	20	20	4.5	90	90
Dosificador F/C	1	17.7	20	4.5	80	80
TOTAL					11809.5	9520

Fuente: Creación de los autores

3.5. Discusión:

En la investigación realizada se evidencia, gracias al análisis inicial de laboratorio, que los parámetros que sobrepasan los estándares de calidad de agua superficial son controlables por un método físico-químico. Es necesario contar con opciones de tratamiento de aguas superficiales que sean accesibles, versátiles, compactas y portátiles para dotar del servicio básico de agua potable a pobladores que por razones principalmente de lejanía y geografía accidentada no pueden acceder a este recurso que, en nuestros días, resulta tan necesario. El módulo de tratamiento propuesto es económicamente viable para pequeños grupos de pobladores, asociaciones o empresas que requieran de agua potable y estén cerca de una fuente superficial de agua, con posibilidad a escalar el volumen de tratamiento de 10m³/h fácilmente a cualquier necesidad; también se trata de una alternativa viable técnicamente, ya que los materiales y componentes

para la construcción del sistema son comerciales y de fácil acceso. Por otra parte, los insumos químicos necesarios como coagulantes y floculantes son de acceso libre con costos razonables.

El análisis de laboratorio final indica que gracias al tratamiento se reducen todos los parámetros a niveles aceptables según la normativa vigente, lo cual otorga garantía que el sistema dota de agua potable para los consumidores de manera segura. La fabricación, instalación y transporte del sistema de tratamiento es fácil y el diseño modular y portátil favorece dichas actividades lo que destaca esta alternativa frente a innumerables opciones las cuales se caracterizan por ser estacionarias y costosas. La realidad de países en vías de desarrollo requiere de alternativas que puedan abastecer de agua potable in situ, ya que la distancia entre los pequeños asentamientos humanos, en muchas ocasiones, es de varios kilómetros; por lo tanto, construir soluciones para todas las realidades resulta poco factible. Esta es una investigación que da como resultado una alternativa viable inédita, ya que actualmente no se cuenta con soluciones de este tipo en la zona sur del Perú; para lograrlo se aplican técnicas físico-químicas de tratamiento optimizadas con equipamiento sofisticado y accesible para el bienestar de poblaciones vulnerables.

4. CONCLUSIONES

El artículo de investigación presenta el diseño y desarrollo de un sistema potabilizador físico-químico, compacto y eco-amigable de aguas superficiales; de la información revisada y obtenida se concluye que:

- Los resultados obtenidos del análisis de laboratorio realizado, a través de los parámetros de calidad organoléptica, elementos orgánicos e inorgánicos, así como parámetros microbiológicos y parasitológicos, cumplen con los límites máximos permisibles del Reglamento de la calidad de agua para consumo humano DS 031-2010 SA DIGESA; normativa peruana vigente para la calidad de agua potable, de esta manera se ratifica y valida la eficiencia en la potabilización del agua.
- El sistema propuesto puede potabilizar hasta 10m³ de agua superficial por hora; está diseñado para diferentes realidades, según la demanda específica; es compacto, fácilmente replicable y escalable debido a sus características de modularidad, portabilidad y eco-amigable ya que aprovecha la radiación solar.
- El consumo energético del sistema puede ser abastecido con tecnología solar con posibilidad de integrar el equipamiento a sistemas energéticos fotovoltaicos o convencionales externos, cuando la demanda lo requiera. El sistema se limita a 4.5 horas de funcionamiento dadas las horas pico solares (HPS) en la zona; está diseñado para potabilizar agua superficial en lugares con nivel de radiación solar medio y alto.
- La inversión económica es de USD 13,975.00; considerando la calidad del equipamiento, materiales, durabilidad, compatibilidad con energías renovables, bajos costos de operación y mantenimiento; se trata de una alternativa idónea, accesible y económica en mediano plazo. Alternativas similares en el medio local (superan los USD 12,000.00); no cuentan con características de modularidad, portabilidad y ser eco-amigables; además de tener alto consumo energético, elevados costos de operación y mantenimiento.
- Los insumos químicos del sistema incurren en un costo de USD 0.37 por cada metro cúbico de agua tratada, la dosificación y selección es determinada de estándares de fabricantes y proveedores. Se recomienda realizar una prueba de jarras “in situ”, para determinar los mejores insumos y dosificación ideal; debido a que la calidad del agua superficial varía de un punto a otro.

REFERENCIAS

Argota-Pérez, G., Argota-Coello, H., & Iannacone, J. (2016). Costo ambiental sostenible relativo a la variabilidad fisicoquímica de las aguas sobre la disponibilidad de metales en el ecosistema. *The Biologist*, 34(1), 21–31. Retrieved from <http://www.ucuenca.ec/ojs/index.php/medicina/article/view/987/875>

Arque, A. (2014). Producción de agua potable en la planta La Tomilla de Sedapar S.A. y manual de operaciones (Vol. 1).

Guzmán, L., Villabona, Á., Tejada, C., & García, R. (2013). Reducción De La Turbidez Del Agua Usando Coag. Naturales: Una Revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 253–262.

INEI. (2017). *Compendio Estadístico Arequipa 2017*.

Korkusuz, E. A., Beklioğlu, M., & Demirer, G. N. (2004). Treatment efficiencies of the vertical flow pilot-scale constructed wetlands for domestic wastewater treatment. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 28(5), 333–344. <https://doi.org/10.3906/sag-1203-95>

Krewski, D., Yokel, R. a, Nieboer, E., Borchelt, D., Cohen, J., Kacew, S., ... Rondeau, V. (2007). Human Health Risk Assessment For Aluminium, Aluminium Oxide, and Aluminium Hydroxide. In *J Toxicol Environ Health B Crit Rev* (Vol. 10). <https://doi.org/10.1080/10937400701597766.HUMAN>

Liang, Y., Hilal, N., Langston, P., & Starov, V. (2007). Interaction forces between colloidal particles in liquid: Theory and experiment. *Advances in Colloid and Interface Science*, 134–135(December 2020), 151–166. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2007.04.003>

Londoño, L. F., Londoño, P. T., & Muñoz, F. G. (2016). Los Riesgos De Los Metales Pesados En La Salud Humana Y Animal. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153)

MINAM. (2017). Estandares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua. *El Peruano*, pp. 6–9. Retrieved from <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>

MINSA. (2011). Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. In Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud.

Muthuraman, G., Sasikala, S., & Prakash, N. (2008). Proteins from Natural Coagulant for Potential Application of Turbidity Removal in Water. *Certified International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 9001(1), 2277–3754.

Organización Mundial de la Salud. (2006). Guías para la calidad del agua potable. In *Guías para Calidad del Agua Potable* (Vol. 1). Retrieved from https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf

Quirós, N., Vargas, M., & Jimenez, J. (n.d.). Desarrollo de coagulantes y floculantes para la remoción del color en aguas de consumo humano; el río Humo, Reserva forestal Río Macho.

SENAMHI. (2003). *Atlas de energía solar*.

Solis, R., Laines, J. R., & Hernández, J. R. (2012). Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(3), 229–236.

SUNASS. (2004). *La calidad del agua potable en el Perú*.

Yin, C.-Y. (2010). Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *The Principles of Green and Sustainability Science*, 27. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2493-6_7

SEMBLANZA DE LOS AUTORES



José Alberto Aguilar Franco: Obtuvo el grado de Ingeniero Industrial en la Universidad Católica San Pablo, Perú, donde actualmente es profesor titular, es formulador de proyectos y Director del Instituto de Energía y Medio Ambiente de la Universidad Católica San Pablo. Desarrolló sus estudios de maestría en la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro (PUC – Río) y Universidad Nacional de San Agustín, Perú (UNSA). Ha desarrollado una estancia de investigación en Italia para Capacitación en Uso de Maquinarias Ecológicas. Cuenta con experiencia como asesor de Tesis, además trabaja como Formulador de Proyectos bajo la modalidad de concurso a nivel Nacional en proyectos de Investigación e Innovación convocadas por el Estado Peruano.



Romel Gordillo Pinto: Obtuvo el grado de Ingeniero Industrial en la Universidad Católica San Pablo, Perú, donde actualmente es docente, es formulador de proyectos entre la universidad y empresas privadas. Desarrolló sus estudios de maestría en la Universidad Nacional de San Agustín, Perú (UNSA). Cuenta con experiencia como mecánico y planificador de mantenimiento, diseñador industrial, supervisor de proyectos agroindustriales, además trabaja como Formulador de Proyectos bajo la modalidad de concurso a nivel Nacional en proyectos de Investigación e Innovación convocadas por el Estado Peruano.