



OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE AIREACIÓN CON PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA BAHIA INTERIOR DE PUNO

OPTIMIZATION OF THE AERATION SYSTEM WITH SOLAR PHOTOVOLTAIC PANELS FOR THE TREATMENT OF WASTEWATER IN THE PUNO INLAND BAY

Henry Shuta Lloclla^{1,*}; Lucio Ávila Rojas¹; Rogelio Flores Franco¹; Gregorio Meza Marocho¹; Olger Ortega Achata¹

¹Universidad Nacional del Altiplano, Escuela de Posgrado, Av. Floral N° 1153, Ciudad Universitaria, Puno, Perú, henshuter@hotmail.com

RESUMEN

La optimización de sistemas de aireación a una altura por encima de 3 800 msnm requiere un rediseño, debido a que las condiciones normales en la ciudad de Puno no son estables respecto a las condiciones normales a nivel del mar, de manera que se recalculan condiciones termodinámicas y fisicoquímicas. El presente estudio hace hincapié en la determinación de la saturación de oxígeno en la bahía interior, obteniéndose un valor de 5.76 mg/L, valor importante para el dimensionamiento de la potencia del soplador; a través de un diseño experimental para optimizar el caudal necesario (Q), la variación de presión (P) y la potencia óptima (POPT) del soplador cuyos valores optimizados dieron: POPT = 8.51 PSI QOPT = 295.3 Pie³/min y POPT = 11.71 KW. Se logró desarrollar el diseño de todos los componentes del generador fotovoltaico (Generador, Acumulador, regulador e Inversor), que permite obtener las mejores condiciones de funcionamiento del sistema de aireación para satisfacer la demanda óptima de 11.71 Kw. Para efectos de propuesta del uso de generación con energía fotovoltaica, se consideró trabajar con una potencia nominal de 3 Kw y para cubrir la energía total óptima se utilizará hasta 4 módulos equivalente de 3 kw, haciendo un total de 12 kw. La ventaja comparativa del proyecto optimizado frente al uso de energía eléctrica en términos económicos fue: para el caso de energía eléctrica proveniente de electro Puno: S/. 80, 650.82, correspondiente a operación y mantenimiento; mientras que para el proyecto fotovoltaico optimizado es de; S/. 87,340.00, que de inicio es más costoso, pero que no representa costos de operación mensuales.

Palabras clave: Aireación, difusión, difusor, optimización, energía fotovoltaica, oxígeno disuelto, índice de calidad de agua.

ABSTRACT

The optimization of aeration systems at a height above 3 800m requires a redesign, since normal conditions in the city of Puno are not stable with respect to normal conditions at sea level, so that thermodynamic conditions are recalculated And physicochemical; The present study emphasizes the determination of the saturation of oxygen in the inner bay, obtaining a value of 5.76 mg/L; An important value for the sizing of the blower power. A factorial experimental design 2² was designed to optimize the flow rate (Q), the pressure variation (P) and the optimum power (POPT) of the blower whose optimized values gave: POPT = 8.51 PSI QOPT = 295.3 Pie³ / min and POPT = 11.71 KW. It was possible to develop the design of all the components of the photovoltaic generator (Generator, Accumulator, regulator and Inverter). That allows to obtain the best operating conditions of the aeration system to satisfy the optimum demand of 11.71 Kw; For purposes of proposal of the use of generation with photovoltaic energy, it was considered to work with a nominal power of 3 Kw and to cover the total optimum energy will be used up to 4 modules equivalent of 3 kw, making a total of 12 kw. The comparative advantage of the project optimized against the use of electric energy in economic terms was: for the case of electric energy from electro Puno S / . 80, 650.82, corresponding to operation and maintenance; While for the optimized photovoltaic project it is of; S / . 87,340.00. Which starts is more expensive, but does not represent monthly operating costs.

Key Words: Aeration, dissemination, diffuser, optimization, photovoltaics, dissolved oxygen, index of water quality.

*Autor para Correspondencia: henshuter@hotmail.com





INTRODUCCIÓN

En el año 2008 se instaló cuatro sistemas de aireación en la bahía interior de Puno, con el fin de mejorar la calidad del agua, como son: oxígeno disuelto, DBO, DQO, PH, Temperatura, entre otros. De éstos cuatro sistemas, uno fue transferido a la laguna de estabilización del Espinar que actualmente viene monitoreando la Empresa EMSA-PUNO, según Convenio Interinstitucional y los otros tres se encuentran actualmente operativos en la bahía interior de Puno, a cargo de la ALT (Autoridad Binacional de Lago Titicaca). Las Acciones realizadas a la fecha y debido el tiempo que los Sistemas de aireación vienen funcionando con carácter de prueba, si bien se aprecia una mejora de la calidad del agua en el área de influencia de los mismos. Sin embargo, no se cuenta con el registro de datos que permita realizar una evaluación integral del sistema de aireación de la bahía interior de Puno. La contaminación en puntos focales del Lago Titicaca constituye, sin duda, un problema que está afectando no sólo a la biodiversidad sino al ser humano que habita la zona. El problema de la contaminación hídrica, originado por la descarga de efluentes no tratados, es bastante común y grave en nuestros países, debido a que no existe un control adecuado de parte del Estado hacia la industria y la población en general, y los efectos abarcan un espectro amplio de problemas, que van desde la pérdida de recursos hidrobiológicos, hasta daños a la salud. Aunándose, en Bolivia, la inexistencia de una ley de aguas actualizada. (Jiménez, 1988). Las problemáticas ambientales y en especial las que se refieren a la polución hídrica, están relacionadas con varias causales internas y externas. La carencia de una gestión integral de residuos y la práctica de la ganadería intensiva están poniendo en riesgo al humano, al ecosistema y a la biodiversidad en general. La costumbre de que el ganado permanezca en la orilla del lago para que se alimente de la totora y otra vegetación acuática aumenta los niveles de contaminación en el agua, creándose un ciclo cerrado de contaminación. (ALT, 2012).

En la bahía de Puno se verificó un proceso descontrolado de contaminación que conlleva al deterioro ambiental del ecosistema de la ciudad de Puno, generando daños a la salud, a la diversidad en plantas y animales así como a las funciones ambientales; La eutrofización ha causado cambios negativos sobre el comportamiento de la flora acuática y por consiguiente ha afectado la fauna lacustre. Más del 98% del fondo de la bahía interior de Puno es casi anóxica con niveles de oxígeno disuelto bajos, que determina la extinción de los organismos bentónicos. La fauna bentónica se ha extinguido en más del 98% del área de fondo, lo cual ha generado una interrupción de los procesos metabólicos del ecosistema Fito; La mayor parte del Lago Titicaca puede clasificarse como eutrófica y habitualmente deficiente en nitrógeno, quizá excepto durante el período de mezcla. Varios factores biogeoquímicos pueden favorecer la limitación por nitrógeno en el lago Titicaca (Hannes, 1999). El elevado índice de erosión de las rocas sedimentarias marinas ricas en fósforo de la cuenca vertiente puede causar una carga en Fósforo relativamente elevada. Se sugiere que la fijación de nitrógeno puede ser baja en los medios terrestres que rodean el Titicaca, y que ésta puede contribuir a la relativa pobreza en nitratos de los ríos que llegan al lago. Por último, los aportes de NO₃⁻ y NH₄⁺ de origen antrópico son relativamente bajos en relación con los de otras regiones más pobladas e industrializadas del mundo, donde las lluvias ácidas y las descargas de aguas residuales pueden elevar la concentración de nitrógeno.

La instalación de motores base 5, el área de investigación o zona de influencia para mejorar la calidad de agua en la Bahía interior Puno (Figura 1).





Figura 1. Instalación de motores y soplador base 5 (ALT, 2013)

La Autoridad Autónoma Binacional del Lago Titicaca (ALT) del sistema hídrico TDPS (Titicaca – Desaguadero – Poopo – Salar de Coipasa), ente normativo y mediante Memorándum del 26 de Octubre del 2006, encarga a la ALT hacer la intervención de la descontaminación de la bahía interior de Puno, bahía de Cohana Bolivia, cuenca del río Ramis y cuenca del río Suches. En ese escenario, la primera acción de la ALT es la cosecha de *lemna giba* (lenteja de agua) en un volumen de 42,000 m³ entre los años: 2008, 2009 y 2010. Basado en un trabajo experimental, (Oswald, 1972) en la que recomienda que, para desarrollarse una concentración específica de algas en una laguna, su profundidad permisible no debe exceder tres veces la profundidad de la penetración.

Posterior a ello, se hace la instalación de 4 sistemas de aireadores en la bahía interior de Puno, con el fin de mejorar la calidad del agua, de los 4 sistemas de aireación uno fue trasladado a la laguna de estabilización de Espinar y tres se encontraron operativos que son: los sistemas de aireación (01) y (02) que está en la base (5) en el frontis Una-Puno y el sistema de aireación (03) que está en la bases (7) en el lado adyacente del muelle del Lago Titicaca (entrada, Turística) (Gibbon, 1987). Los tres sistemas de aireación son similares, tienen el mismo diseño de instalación, cuenta, con un compresor marca Dresser Roots que es ocasionado por un motor eléctrico de 25 HP mediante un sistema de transmisión de fajas en V, su operación y funcionamiento de cada equipo es de forma automática desde cada caseta, actualmente viene operando alternadamente en tiempo de una hora, para cada equipo en un lapso de siete horas diarias, a la salida del soplador centrífugo se acopló una tubería de 2 pulgadas de diámetro como línea de tubería principal de 250 m de longitud y 30 líneas de tuberías secundarias (manguera de 5/8 de pulgada) de material polietileno de alta y baja densidad acoplado a la tubería principal distribuido equitativamente en ambos lados de 15 líneas de 15m y 30 m de extensión conectados alternadamente cada uno a un difusor al igual que al lado derecho, teniendo un total de 30 difusores para cada sistema de aireación en un área efectiva de 150m de largo y un ancho de 66.45m (ALT, 2012). Los sistemas biológicos aerobios del suministro de oxígeno para que los microorganismos puedan oxidar la materia orgánica hasta CO₂ Y H₂O, depurando las aguas residuales. La aireación tiene como objetivo transferir oxígeno disuelto y mantener el sistema bien mezclado, es decir que el reactor se encuentre en condiciones homogéneas (Cochran, 1984).

En los sistemas de lodos activados es primordial la transferencia de oxígeno, ya que estos sistemas se diseñan para operar con niveles de potencia entre 0.04 HP/m³ y 0.08 HP/m³, el criterio de mezcla completa (nivel de potencia >0.007 HP/m³) queda satisfecho (Martínez y Delgado, 2009). En estos contextos, es preciso prever un diseño con el nivel de potencia que asegure el cumplimiento de las dos condiciones: la de satisfacer la demanda de O₂ y la de mantener el reactor en mezcla completa (Sierra, 2011). Para el análisis se indica a continuación los equipos de aireación empleados en el tratamiento de aguas residuales son de tres tipos: Equipos de aireación difusa o de aire comprimido, en los que el aire se rompe en burbujas y se dispersa a través del tanque. Sin embargo, los equipos



de aireación no se instalarán necesariamente en lugares donde prevalezcan las condiciones estándar de temperatura y presión, ni mucho menos se utilizará para airear aguas limpias. Por tal motivo, se requiere conocer diferentes parámetros que servirían para corregir el comportamiento de los equipos a las condiciones reales de operación (Mendoca, 1990), a diferencia de los aireadores de superficie donde la transferencia de oxígeno se lleva a cabo solamente en la superficie del reactor, razón por la cual se toma concentración de saturación a esas condiciones de presión, en los difusores, la transferencia se lleva a cabo desde que entra el aire al fondo del reactor, hasta que sale del mismo hacia la superficie del líquido (Gibbon, 1987).

Respecto al proceso de aireación y tratamiento biológico, este indica acerca del tratamiento de aguas residuales que la aireación es el proceso mediante el cual el agua se pone en contacto íntimo con el aire para modificar las concentraciones de sustancias volátiles contenidas en ella. Su función principal, en el tratamiento de aguas residuales, consiste en proporcionar oxígeno y mezcla en los procesos de tratamiento biológico aerobio. A continuación, se resume sus funciones más importantes, (Sierra, 2011), se resalta la actividad fotosintética que promueve el crecimiento de algas, las cuales pueden producir compuestos constantes de olores y sabores, estos compuestos no son volátiles y la aireación no es eficaz para su remoción. Sin embargo, compuestos volátiles causantes de olores y sabores pueden removerse mediante aireación (Benefiel, 1980). La aireación se usa para remover hierro y manganeso oxidable, especialmente en aguas de pozo, al convertir las formas solubles ferrosas y manganosas en las formas férricas y mangánicas insolubles. El metano, aunque muy insoluble, puede encontrarse en algunas aguas y removerse mediante aireación, así como otros compuestos orgánicos volátiles (Romero, 2000).

La aireación difusa se define como la inyección de gas, aire u oxígeno, bajo presión, por la parte inferior de la superficie libre del fluido. Los difusores lanzan, a través del agua o fluido, burbujas de aire provenientes de toberas o distribuidores colocados en el fondo del tanque de aireación. El aire aplicado proviene de un compresor, con una presión en el fondo del tanque de aireación que depende de la profundidad del agua en el mismo, de las pérdidas en la tubería de distribución y de la tasa de aplicación. Para presiones bajas, del orden de 0,7 kg/cm², 10 psi, 69 k Pa, se usan sopladores directos o de presión positiva que generalmente rotan a velocidad alta; para presiones altas es preferible utilizar compresores turbo (Mandt, 1982). Para esto se utilizan difusores de diferentes tipos como los de burbuja fina que están contruidos con tubos cerámicos porosos o con estructuras cilíndricas metálicas cubiertas con una envoltura de tela de dacrón o de cuerda de sarán. La eficiencia de los de burbuja gruesa es del orden de un 6%, y la de los de burbuja fina de un 9% (Rich, 1980). La estructura de soporte de un aireador mecánico debe diseñar teniendo en cuenta los efectos de cargas y momentos no uniformes causados por pérdida de un álabe o de una paleta de la turbina, o por acumulación de material extraño sobre el eje (Yáñez, 1993).

Los equipos aspirantes poseen un eje hueco largo de 1,2 m. con un motor eléctrico en un extremo y una hélice en el otro, la cual aspira aire de la atmosfera, hacia el eje. La velocidad del aire y de la hélice crea turbulencia y forma burbujas pequeñas, desde las cuales se disuelve el oxígeno. Generalmente se instalan, con ángulos variables de inclinación, sobre flotadores, en tanques de aireación y en zanjones de oxidación. Estos equipos tienen capacidades de transferencia de oxígeno de 0,13 a 0,21 kg O₂/MJ, y de 0,5 a 0,8 kg O₂/kWh (Barbará, 1981).

Los aireadores superficiales de paletas sacan el agua desde debajo de estas y la ponen en contacto con el aire a través de la superficie del agua. El primer rotor o cepillo de aireación fue desarrollado por Kessener (1926) y adaptado por Pasveer a los zanjones, 25 años más tarde. La tasa de oxigenación de un cepillo es de 1,5 a 2,1 kg O₂/kWh; tienen una eficiencia del 50% en transferencia de momentum del motor en velocidad del agua en la zanja (Mendoca, 1990).





El área de influencia de las turbinas sumergidas es menor que la de los aireadores superficiales, pero su capacidad de transferencia de oxígeno es mayor. Las turbinas tienen capacidad de transferencia de oxígeno de 0,30 a 0,59 kg/ MJ. J, 1 A 2,1 kg O₂/kWh, incluyendo la potencia requerida por aireación y por mezcla. Comercialmente existen equipos con motores hasta de 112 kW y, de diseño especial, hasta de 260 kW (Barnes, 1983). Respecto al caudal de uso se recomiendan caudales de aireación de 20 a 30 L/m³, min para mantener lodos activados en suspensión completa mediante aire difuso y niveles de potencia de 196 a 39 W/ m³ para aireadores mecánicos. Para digestores aerobios, 20 a 40 L/m³, min de aire difuso 0 20 a 40 W /m³ de aireación mecánica (Metcalf y Eddy, 1996). Ya que se generan también burbujas de aire, éstas se crean mediante aire comprimido a través de un difusor, o por medio de aireadores mecánicos, los cuales introducen aire al líquido mediante mezcla turbulenta. (Romero, 2004) que a su vez tiene como objetivo determinar las tendencias en el tiempo, de algunas características Físicas y Químicas de los cuerpos del agua (GWW, 2001).

La energía solar fotovoltaica se basa en la captación de energía solar y su transformación en energía eléctrica por medio de celdas fotovoltaicas. Los materiales semiconductores, para su utilización en celdas fotovoltaicas, han de ser producidos en purezas muy altas, normalmente con estructura cristalina. La conversión de la energía solar a eléctrica se realiza de manera limpia, directa y elegante. Existen dos elementos que sustentan la utilización de la energía fotovoltaica: “La necesidad de proteger el medio ambiente y la necesidad de crecer económicamente” (Jiménez, 2008).

Los paneles solares están formados por varias celdas fotovoltaicas. Las células se montan en serie sobre paneles o módulos solares para conseguir un voltaje adecuado a las aplicaciones eléctricas; los paneles captan la energía solar transformándola directamente en eléctrica en forma de corriente continua, que se almacena en acumuladores, para que pueda ser utilizada fuera de las horas de luz. Los módulos fotovoltaicos admiten tanto radiación directa como difusa, pudiendo generar energía eléctrica incluso en días nublados. En general, las células tienen potencias nominales próximas a 1Wp, lo que quiere decir que con una radiación de 1000W/m² proporcionan valores de tensión de unos 0,5 V y una corriente de unos dos amperios (Labouret, 2008).

Poner operativo los sopladores centrífugos en la bahía interior de Puno (BIP) utilizando energía eléctrica provenientes de las redes eléctricas de electro Puno resultan costosos y poco eficaces, como evidencia el consumo en kwh, reflejada en los recibos de facturación de electro Puno y complementándose con la sobresaturación del oxígeno disuelto (OD) en la zona de aireación además de pagos adicionales por operación y mantenimiento (Romero, 2004).

Para ello se desarrolló el ensayo de experimentación con los equipos existentes y adicionándose equipos de medición en la instalación ubicado al frontis de la UNA – PUNO denominada base (5). Previamente se realizó la batimetría así como los análisis fisicoquímicos del agua y el dimensionamiento de la zona de aireación (Rodríguez, 1991). El diseño experimental factorial compuesto “factorial compuesto 2²” permitió optimizar el caudal de oxígeno (Q_{OPT}) necesario para la aireación en el área de influencia (evitando su sobresaturación) y obteniéndose la potencia óptima requerida en el motor eléctrico para una determinada elevación de presión óptima (P_{ROPT}), en el soplador centrífugo que permita transportar el flujo de aire desde la base (5) hasta los difusores instalados a 250 m de la BIP (Metcalf y Eddy. 1996).

La optimización del sistema de aireación está directamente con la reducción de costos. Lográndose reducir el costo e consumo y la cantidad de oxígeno necesario a la presión requerida. Para seguir reduciendo costos, se planteó como alternativa tecnológica la propuesta de instalación para la generación energía, mediante el uso de paneles fotovoltaico, para las condiciones de operación óptimas obtenidas en el ensayo experimental (Mendoza, 1990).





MATERIALES Y MÉTODOS

Metodología de análisis en laboratorio y medición en campo. Parámetros establecidos del Monitoreo por DIGESA-Decreto Ley n° 17752 “Ley General de aguas” que son considerados: parámetros de medición en campo, como: pH, Temperatura, Conductividad, Oxígeno disuelto; Parámetro orgánico, que se consideró: demanda bioquímica de oxígeno, en 5 días (DBO₅) y DQO; los parámetros determinados en laboratorio como, turbiedad, sólidos suspendidos, sólidos disueltos totales, nitratos, nitritos, sulfatos, fosfato, dureza total y nutrientes como: Nitrógeno total, fósforo total, nitrógeno amoniacal y Parámetros biológicos como: Coliformes totales y Coliformes Termotolerantes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados en variables codificadas y naturales de la potencia a desarrollar por el soplador centrífugo empleando el programa diseño experto para el modelo completo

Tabla 1. Resultados para la selección del modelo matemático a utilizarse (diseño experto 7.1)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p – Value Prob > F	
Mean vs Total	1265.04	1	1265.04			
Linear vs Mean	452.68	2	226.34	70.63	<0.0001	
2FI vs Linear	32.04	1	32.04	24198.19	<0.0001	Suggested
Quadratic vs 2FI	3.103E-003	2	1.552E-003	1.23	0.3479	
Cubic vs Quadratic	2.919E-004	2	1.459E-004	0.086	0.9192	Aliased
Residual	8.520E-003	5	1.704E-003			
Total	1749.76	13	134.60			

Tabla 2. Análisis de varianza de la superficie de respuesta del modelo cuadrático completo en variables codificada (diseño experto 7.1)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F value	p – value Prob > F	
model	484.72	5	96.94	77009.98	<0.0001	significant
A-X ₁	260.92	1	260.92	2.073E+005	<0.0001	
B-X ₂	191.76	1	191.76	1.523E+005	<0.0001	
AB	32.04	1	32.04	25448.50	<0.0001	
A ²	2.104E-004	1	2.104E-004	0.17	0.6949	
B ²	2.645E-003	1	2.645E-003	2.10	0.1905	
Residual	8.812E-003	7	1.259E-003			





Lack of Fit	3.492E-003	3	1.164E-003	0.88	0.5246	not significant
Pure Error	5.320E-003	4	1.330E-003			
Cor Total	484.73	12				

Tabla 3. Parámetros estadísticos (diseño experto 7.1)

Statistical parameter	Result	Statistical parameter	Result
std. Dev.	0.035	R-Squared	1.0000
Mean	9.86	Adj R-Squared	1.0000
C.V. %	0.36	<u>Pred</u> R-Squared	0.9999
PRESS	0.033	Adeq Precisor	893.560

Modelo Matemático

En variables codificadas (Tabla 3):

$$y = 9.8 + 5.7 X_1 + 4.9 X_2 + 2.8 X_1 X_2 - 5.5 \cdot 10^{-3} X_1^2 + 0.02 X_2^2$$

En variables Naturales:

$$y = 9.86 + 5.71 \left(\frac{P - 9.5}{5.5} \right) + 4.9 \left(\frac{Q - 223.5}{110.5} \right) + 2.83 \left(\frac{P - 9.5}{5.5} \right) \left(\frac{Q - 223.5}{110.5} \right) - 5.5 \times 10^{-3} \left(\frac{P - 9.5}{5.5} \right)^2 + 0.02 \left(\frac{Q - 223.5}{110.5} \right)^2$$

Tabla 4. ANOVA de la superficie de respuesta del modelo simplificado con término significativo (diseño experto 7.1)

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F value	p – value Prob > F	
model	484.71	3	161.57	1.220E+005	<0.0001	significant
A-X ₁	260.92	1	260.92	1.971E+005	<0.0001	
B-X ₂	191.76	1	191.76	1.448E+005	<0.0001	
AB	32.04	1	32.04	24198.19	<0.0001	
Residual	0.012	9	1.324E-004			
Lack of Fit	6.595E-003	5	1.319E-003	0.99	0.5176	not significant
Pure Error	5.320E-003	4	1.330E-003			
Cor Total	484.73	12				





Tabla 5. Parámetros estadísticos

Statistical parameter	result	Statistical parameter	result
std. Dev.	0.036	R-Squared	1.0000
Mean	9.86	Adj R-Squared	1.0000
C.V. %	0.37	Pred R-Squared	1.0000
PRESS	0.024	Adeq Precisor	1065.922

Los resultados de la tabla 5, se han obtenido con el programa del diseño experto el análisis de varianza (ANOVA) que permite determinar el modelo a utilizarse y que corresponde al modelo con interacción para los dos factores, caudal de aire (Q_a) e incremento de presión (P). Se desarrolló el ANOVA para el modelo completo de segundo orden, siendo significativo las variables lineales y de interacción, predominando la variable lineal del aumento de presión (x_1), seguido del caudal (X_1) y luego de la interacción (X_1, X_2), siendo despreciable los términos cuadráticos de caudal (X^2), seguido del aumento de presión (X^2); cuyos relaciones de variables tiene un buen ajuste representadas por el coeficiente de correlación R^2 .

La figura 2, muestra la variación de la Temperatura ($^{\circ}C$) en las muestras tomadas del Sistema de Aireación 1 y 2 Base 5 en la Bahía Interior Puno. Los valores determinados presentan un promedio estadístico de $19,4295^{\circ}C$. Los valores más altos de la temperatura del agua se obtuvieron en la superficie, mientras en la columna de agua de 3m. Estos valores tienden a bajar en un porcentaje de 8 %.

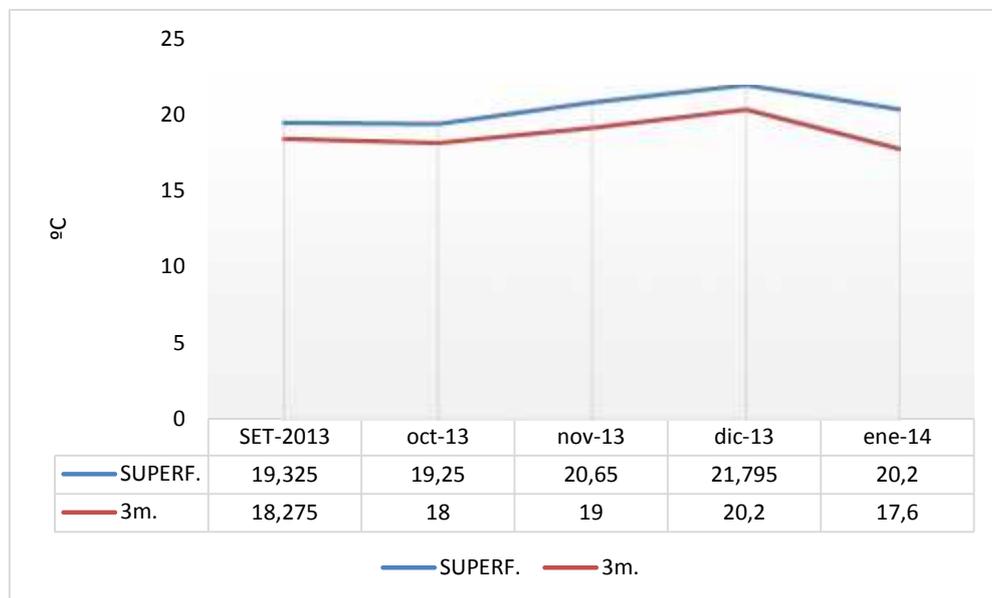


Figura 2. Temperatura del agua a partir del sistema de aireación en la bahía interior de puno

Con los valores promedio obtenidos para los nueve parámetros fisicoquímicos, obtenemos el valor de **ICA**, de acuerdo con Brown R. tenemos:

$$ICA_{DWQI} = 100 - (\sqrt{F^2 + F2^2 + F3^2} / 1.732)$$





El índice incorpora tres elementos:

Alcance (F1): Porcentaje de parámetros que exceden la norma.

Frecuencia (F2): Porcentaje de pruebas individuales de cada parámetro que excede la norma.

Amplitud (F3): Magnitud en la que excede la norma cada parámetro que no cumple.

Se desarrolló el modelo matemático para analizar el efecto del flujo de aire admitido (X2) y la variación presión (X1), utilizando la energía eléctrica que permitió obtener la potencia (Y) y capacidad de aireación del soplador centrifugo. Para lo cual se aplicó el diseño factorial 2² centrado rotacional, resultando un modelo de tipo lineal con interacción obtenido en el programa diseño experto. La respuesta obtenida fue conveniente hallar su valor Óptimo, resultando el modelo matemático y sus valores óptimos siguiente:

$$Y = 9.86 + 5.71X_1 + 4.9X_2 + 3.83X_1X_2$$

Valores Óptimos Obtenidos:

$$P_{OPT} = 8.51 \text{ PSI} \quad Q_{OPT} = 295.3 \text{ CFM}$$

$$P_{OPT} = 11.71 \text{ KW}$$

En base a los resultados óptimos logrados del diseño experimental se logró desarrollar el diseño de todos los componentes del generador fotovoltaico (Generador, Acumulador, regulador e Inversor), que permite obtener las mejores condiciones de funcionamiento del sistema de aireación (Mendoca, 1990). Resultando satisfacer la demanda de 11.71 kW para las condiciones óptimas, obteniendo 4 módulos experimentales equivalentes de 3000 W haciendo un total de 12 kW; cada módulo experimental diseñado cuenta con 10 generadores fotovoltaicos de 24 voltios y 300 W, 12 baterías de 24v 200Ah, el regulador con seguidor MPPT que trabaja a la máxima potencia cuya corriente máxima de carga es de 54.45 A y el inversor de potencia nominal 2 Kw y soporta una potencia pico 2.4 veces la capacidad nominal (4.8 kw). En este último caso por seguridad en el diseño y costo no muy diferenciado se seleccionó de 3kw de potencia nominal y potencia pico hasta 7.2kw, con lo que garantizaría el arranque del motor eléctrico. Se diseñó también el área de tejado así como los sistemas de protección correspondientes las mismas que se indican en el plano (Martínez, 1990).

Los trabajos de investigación relacionados al sistema de aireación mediante paneles fotovoltaicos en lagos son muy limitados, teniendo la aplicación solo la parte de la componente solar para otras aplicaciones como bombeo para riego, iluminación y otros usos, las mismas que se indican a continuación considerando solo como referencia en otros usos. Benefiel, (1980) recomienda lo siguiente: Potencia Mínima FV = Carga de la Bomba \times 1.3 (14) Por lo tanto, se tiene: Potencia Mínima FV = 732 \times 1.3; Potencia Mínima = 951.6 Watts. Conforme con la potencia, para accionar el equipo de bombeo y analizando la disponibilidad en el mercado de los principales distribuidores de paneles solares, según especificaciones técnicas, potencia, número de paneles y precio, se eligen 6 paneles solares marca Shell Modelo SQ 165-PC.

Existen otros trabajos desarrollados en su aplicación en proyectos de inversión en la zona, como el caso de la planta de tratamiento de lodos activados, que se ubica en la provincia fronteriza de Yunguyo y que cuenta con un sistema de aireación de tipo disco de burbuja fina que trabaja a 3 metros debajo del nivel del agua (Figura 1); en comparación nuestra que es un difusor de membrana fina que está a 2.5 metros por debajo del nivel del agua. Ambos resultarían mejor, si trabajasen con difusores de micro burbujas o nano burbujas que están en investigaciones recientes correspondientes a la nanotecnología.





En la tabla 6, se muestra la comparación de resultados fisicoquímicos monitoreados en esta investigación y comparación con otros resultados encontrados dentro de la revisión bibliográfica.

Tabla 6. Comparación de resultados fisicoquímicos monitoreados

PARÁMETROS BASE 5 B. int. 1 y 2	UNID.	ECA - AGUA CATEGORIA 4 "Lagos y Lagunas"	DATOS F. Q. MONITOREO PROPIO	DATOS F. Q. T. Donaires W. Zamalloa F. Q. ING. QUÍMICA	DATOS F. Q. D. F. Beltrán Farfán F. C. BIOLÓGICAS
Oxígeno Disuelto	mg/L	5	8.58	5.68	6.62
Potencial H.	pH	6.5 – 8.5	8.34	9.15	9.43
Temperatura	°C		19.43	15.51	15.68
C. Eléctrica	µs/Cm	5000	1464.82	1.87	1666.95
Turbidez	NTU		2.12	11.00	NR
DBO ₅	mgO ₂ /mL	5	40.27	NR	NR
DQO	mgO ₂ /mL		90.6187	NR	NR
S.S. totales	mgO ₂ /mL	25	17.025	NR	NR
Fosfatos	mgP/mL		0.7405	NR	1.02
Fósforo total	mgP/mL	0.4	1.2162	0.373	NR
N. amoniacal	mgN/mL	0.02	0.02	0.866	NR
Nitritos	mgN/mL	5	0.0258	0.044	0.07
Nitratos	mgN/mL	5	NR	NR	NR
N. Kjeldahl total	mgN/mL	1.6	NR	NR	NR
C. termotolerantes	NMP/100m L	1000	325	NR	471

Los parámetros fisicoquímicos evaluados en la bahía interior en medio de aireación intermitente (Tabla 6), cuyos valores comparados con los encontrados por Donaires *et al.* (2002); Beltrán (2011), de la Facultad de Ingeniería Química y Ciencias Biológicas de la UNA Puno, para el primer elemento en función al orden en el cuadro se tiene: oxígeno disuelto 5.68 y 6.62 mgO/L, estos valores están dentro de los ECA categoría 4, respecto a los datos de monitoreo propio estos parámetros difieren en un 34% y 23% respectivamente.

CONCLUSIONES

Finalmente, se tomaron en esencia nueve parámetros fisicoquímicos que contribuyeron a la determinación del índice de calidad del agua (ICA), cuyos valores obtenidos dentro del área de influencia aireada fueron Temperatura promedio 19.43 °C, Oxígeno disuelto Promedio 8.58 mg/L, Potencial de hidrogeno promedio pH = 8.34, Conductividad eléctrica promedio 1464.82 µs/Cm, Demanda química de oxígeno promedio 90.62 mg/L, Demanda bioquímica de oxígeno en cinco días promedio 40.27 mg/L, Sólidos en suspensión promedio 17.02 mg/L, Sólidos disueltos totales promedio 691.6 mg/L, Nitrógeno amoniacal promedio 0.029 mg/L, Nitritos promedio 0.0258 mg/L, Ortofosfatos promedio 0.7405 mg/L, Sulfatos promedio 117.37 mg/L. Estos parámetros caracterizaron la calidad de agua. Sin embargo una medida conocida como ICA es propuesta por Brown cuyo valor calculado fue de 65.6069 % y está en el intervalo de 65 – 69 es decir categoría regular.





LITERATURA CITADA

- ALT- Suma Marka (2012). Taller de capacitación para recolección de muestras y medición in- situ de los parámetros físicos, químicos y biológicos del agua con fines de monitoreo.
- Apha, Awwa, Aplf. Métodos normalizados para análisis de aguas y aguas residuales. 17 editions. American public Ghealth association enc. new york 1992.
- Banes, D.(1983). Oxidation ditches wastewater treatments pitman books
- Barbará (1981), equipamientos para tratamiento de aguas, sao paulo
- Benefiel, D. (1980). Biological process design for wastewater treatmen, prentice hall.
- Brown, R. (1970). A water quality index- do we dare water and sewage works. october, 339-343.
- Brown, R. (1983). Water quality index. Application in the Kansas river basin. us-epa report,
- Cochran, W. (1984) técnicas de muestreo.
- Eaton, D. (2005). Standar methods for the examination of water & wastewater. 21. sd
- Gibbon, L. (1987) aireadores de superficie "curso sobre tópicos avanzados en sistemas de esgotos sanitarios, rio de janeiro.
- Global water watch (GWW): práctica del monitoreo físico químico y bacteriológico de la calidad del agua.
- Hannes, k. (1999). Analysis, simulation, and evaluation of maximum power point tracking (mppt) methods for a solar powered vehicle. portland state university.
- Jiménez, M. (1988). Programa de diseño factorial.
- Labouret, A. (2008). Energía solar fotovoltaica. Manual práctico
- Mandt, G. (1982). Oxidation ditches in wastewater treatmen, annarbor science.
- Martínez, D. (1990). Tratamiento del agua residual doméstica por medio de un reactor electroquímico continuo, Azcapotzalco, Dpto. Energía, Av. San Pablo No. 180 Col. Reynosa Tamps, C.P. 02200. México, D.F.
- Mendoca, R. (1990) lagunas de estabilización e aireación mecánica ed joao pessoa, brasil.
- Metcalf y Eddy. (1996). "Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento vertido y utilización. vol. 1 ed. mc graw hill. méxico 250 p.
- Ager, J. Observaciones ornitológicas en la región del Lago Titicaca, Perú-1971 Bolivia. Rev. Univer. Nac. Del Altipl., Puno Perú – 4:76-99.
- Murphy, T. (1976). Design and analysis of industrial experiments.
- Ocola, J. (2014). Informe de monitoreo "ANA" mes de marzo.
- Ostle, B. (1981). Estadística aplicada.
- Prado, A. (1990). Metodología de la investigación. Arequipa.
- Proyect Wet International Foundation / Imta (2005). Interpretación de la información sobre la calidad del agua.
- Rich, G. (1980). Low maitenance, mechanically simple wastewater treatmen systems,mcgraw hill.
- Rodríguez, Sosa. (1991). Teoría y diseño de la investigación científica
- Roldan R. (2008). Fundamentos de limnologia neotropical edi. Escuela colombiana 2º edición
- Romero, A. (2004) tratamiento de aguas residuales. edi. Escuela colombiana 3º edición
- Romero, A. (1996). acuiquímica. Escuela colombiana de ingeniería. santafé de bogotá. página 226.
- Sierra Ramírez, C.A. (2011). Calidad de agua "evaluación y diagnóstico" colombia: editoial universidad demedellin.
- Yáñez, C. (1993), lagunas aireadas, en: "curso para ingenieros sobre operación y mantenimiento de lagunas y lagos para estabilización de aguas residuales", CEPIS, Lima.

