

PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA LA DESINFECCIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES SANITARIAS DE LA TERMOELÉCTRICA DE CIENFUEGOS

TECHNOLOGICAL PROPOSAL FOR CIENFUEGOS THERMOELECTRIC SANITARY WASTING WATERS DISINFECTION

Alejandro Valdés López^{1}, Nelson A. Castro Perdomo² y Yohana Ramírez Alfonso²*

¹ Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA). Universidad de Cienfuegos. Carretera a Rodas km 3 ½, Cuatro Caminos, Cienfuegos, Cuba.

² Departamento de Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de Cienfuegos. Carretera a Rodas km 3 ½, Cuatro Caminos, Cienfuegos, Cuba.

Recibido: Febrero 7, 2019; Revisado: Mayo 5, 2019; Aceptado: Mayo 22, 2019

RESUMEN

En el presente trabajo se hace una propuesta tecnológica para la desinfección de los residuales sanitarios de la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos con el uso de productos clorados lo que permitirá el control de los coliformes fecales antes de su vertimiento a la bahía, cumpliendo lo establecido en la NC 521:2007. Para su realización se elaboró un diseño de experimentos completamente aleatorizado y se calculó la cantidad de réplicas necesarias para asegurar la confiabilidad estadística minimizando el gasto de productos químicos para los análisis. Se llevó a cabo un análisis de regresión para relacionar el cloro residual con la dosificación y así determinar la dosificación óptima a usar. Además, mediante modelos teóricos fue estimado la cantidad de colonias posterior a la desinfección. Para el diseño del sistema se consideraron restricciones de espacio, por lo que fueron usadas técnicas de programación matemática. El sistema permitirá cumplir con lo establecido en las regulaciones medioambientales, garantizando un mayor control de los vertimientos a la bahía de Cienfuegos y la preservación de la salud en la comunidad.

Palabras clave: aguas residuales; coliformes fecales; desinfección.

ABSTRACT

In present work a technological proposal for sanitary residuals of Cienfuegos Thermoelectric Company disinfection is made using chlorinated products which will allow fecal coliforms control before its bay discharge, satisfying NC 521:2007 standard. A completely randomized design of experiments was elaborated and the quantity of replicas necessary to assure the statistical reliability was calculated, minimizing chemical products cost. A regression analysis was carried out to relate residual chlorine with its dosage and thus determine the optimum dosage to be used. In addition, the number of colonies after disinfection was estimated using theoretical models. Space restrictions were considered for system design, so mathematical programming techniques were used. The system will allow compliance with environmental regulations, ensuring greater discharges to Cienfuegos bay control and preservation of community health.

Keywords: wastewater; fecal coliforms; disinfection.

1. INTRODUCCIÓN

La Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos posee certificado un Sistema de Gestión Integrada que abarca las normas cubanas de calidad, seguridad y salud en el trabajo, gestión ambiental y gestión energética, aunque actualmente se encuentra en un proceso de recertificación de cada una de estas en conformidad con nuevas modificaciones. Desde el diseño de la empresa se previó el montaje de un tanque séptico para el tratamiento de los residuales sanitarios, pero a raíz de las auditorías para la certificación del Sistema de Gestión Ambiental en la entidad, entre las no conformidades encontradas está la presencia de coliformes fecales en las aguas albañales con valores muy superiores a los establecidos en la norma NC 521:2007. El límite superior para el vertimiento en las aguas de la zona costera están legislados en 200 colonias por cada 100 ml de agua (NC 521, 2007) y actualmente el de la Termoeléctrica de Cienfuegos es de 16 000 colonias por cada 100 ml de agua lo que, a largo plazo, tiene el potencial de afectar la dinámica del ecosistema local.

El grupo de coliformes fecales está compuesto de bacterias como la *Escherichia coli* o la *Klebsiella pneumoniae* y resulta muy útil para determinar la calidad del agua potable así como las aguas recreacionales (Bitton, 2005). Como su origen es principalmente fecal y en los medios acuáticos, los coliformes son más resistentes que otros microorganismos su ausencia es un indicador de que el agua es bacteriológicamente segura. Por lo tanto, para reducir el impacto ambiental de este residual se propone que se someta a un proceso de desinfección previo a su descarga al cuerpo receptor de la bahía de Cienfuegos.

Entre las diferentes tecnologías para la desinfección Shammas y Wang (2016) señalan la desinfección mediante calor, luz ultravioleta y agentes químicos. Tras considerar diferentes factores como el flujo a tratar, los costos relativos de las tecnologías, espacio disponible en planta y composición del residual se decide proponer la utilización de productos clorados para la desinfección. Esto se fundamenta además en la relativa poca complejidad de esta tecnología y su amplia difusión que la han convertido, según

Spellman (2014) en la más importante para la prevención del esparcimiento de las enfermedades transmitidas por el agua.

Como en la plata el espacio que inicialmente estaba previsto para el sistema de desinfección fue usado para otros propósitos es necesario que el sistema propuesto no comprometa la integridad estructural de otras construcciones lo que impone determinadas restricciones. Por la problemática previamente fundamentada el objetivo de esta investigación consiste en diseñar un sistema para llevar a cabo el proceso de desinfección de este residual.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los principales factores que influyen la eficiencia de la desinfección son la concentración del desinfectante, el tiempo de contacto, la temperatura y el pH. La concentración del desinfectante y el tiempo de contacto son esenciales para la cinética de la desinfección y la aplicación práctica del concepto de CT (multiplicación de la concentración del desinfectante por el tiempo de contacto) (LeChevallier y Au, 2004).

Se asumió como modelo teórico para estimar la cantidad de coliformes fecales el expuesto en White (2010) cuyas ecuaciones se muestran a continuación.

$$\frac{N}{N_0} = 1 \quad \text{para } C_R \cdot t < b \quad (1)$$

$$\frac{N}{N_0} = \left[\frac{C_R t}{b} \right]^{-n} \quad \text{para } C_R \cdot t > b \quad (2)$$

En estas N_0 es la cantidad de coliformes fecales iniciales, N la cantidad de coliformes fecales luego de la desinfección, C_R el cloro residual, t el tiempo de contacto y los parámetros n y b constantes que para efluentes secundarios y coliformes fecales son 2,8 y 3 respectivamente.

Según CONAGUA (2007) una concentración de cloro residual de 2 ppm es suficiente para la desinfección del residual con un tiempo de contacto de al menos 30 min. Mediante experimentos preliminares se determinó que una dosificación inicial en el rango de 4-12 ppm era suficiente para alcanzar este valor. Luego se realizó un diseño de experimento completamente aleatorizado de un solo factor tomando como niveles las dosis de cloro de 4, 6, 8, 10 y 12 ppm. Fijado el tiempo de contacto y las dosificaciones se calculó el cloro residual mediante el método yodimétrico (Patnaik, 2018) usando como producto clorado hipoclorito de sodio al 12 % e hipoclorito de calcio al 65 %.

Para asegurar la significación estadística previamente se calculó el tamaño necesario de la muestra por la ecuación 3 de acuerdo a lo propuesto por Montgomery (2012) asumiendo que el parámetro D/σ es igual a 3 y $\alpha=0,05$ donde a es la cantidad de niveles del experimento y n la cantidad de análisis por nivel. La relación entre el parámetro Φ^2 y α se determinó por la curva de operación característica para el modelo de análisis de varianza de efectos fijos y para relacionar el cloro residual con la dosificación se llevó a cabo un análisis de regresión.

$$\Phi^2 = \frac{nD^2}{2a\sigma^2} \quad (3)$$

Para el contacto entre el producto clorado y el residual se propuso la construcción de 3 cámaras serpenteantes que bajo condiciones adecuadas su comportamiento se asemeja a

un reactor de flujo pistón. Las principales variables que determinan las dimensiones de este sistema son el largo (L), ancho (a) y profundidad (h) de los compartimientos. El ancho total del sistema no puede ser mayor que 4 m, dejando un margen de espacio por factores constructivos, debido que fue instalado un tanque de almacenamiento de combustible en el lugar y la profundidad no debe exceder 1,2 m porque el sistema se diseñó para que el agua fluyera por reboso y de esta manera quedaría por debajo del nivel del mar. Se desea que el operador dosifique el sistema 1 vez al día por lo que su volumen total de las tres cámaras debe ser igual al flujo tratado por día. Finalmente, los decisores desean que el ancho y la longitud del sistema sea mínima.

Para estimar el costo para la dosificación se usaron los datos de la Tabla 1. El costo del desinfectante fue calculado conociendo la cantidad que consumiría la planta por año y su precio en el mercado. Los precios del hipoclorito de sodio y el de calcio fueron obtenidos de la planta Electroquímica de Sagua que comercializa los productos en el territorio nacional.

Tabla 1. Precios de los desinfectantes usados en el sistema

<i>Desinfectante</i>	<i>Precio</i>
Hipoclorito de Sodio	10,043 \$/L
Hipoclorito de Calcio	67 177,241 \$/t

El costo de construcción del sistema fue estimado mediante la ecuación 4 propuesta por (Couper et al., (2012) donde F_M es un factor de costo igual a 0,55 para el concreto y V es el volumen total del sistema.

$$C(USD) = 1,218 \cdot F_M \cdot \exp(2,631 + 1,3673 \cdot \ln V - 0,06309 \cdot (\ln V)^2) \quad (4)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Cálculo de la dosificación óptima

De acuerdo a la ecuación 2 para un cloro residual de 2 ppm y un tiempo de contacto de 30 min la cantidad de colonias esperadas posterior al tratamiento es de $N \approx 4$, por lo que se lograría el cumplimiento de lo establecido en la NC 521:2007. Para una potencia de la prueba superior al 95 % de acuerdo a lo propuesto por Montgomery (2012) fue necesario realizar 5 réplicas por cada nivel del experimento para dar un total de 30 análisis, 6 por cada concentración como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Determinación de la cantidad de réplicas para el diseño de experimento

<i>N</i>	Φ_2	Φ	$a(n - 1)$	<i>B</i>	$1 - \beta$
3	2,7	1,6432	10	0,38	0,62
4	3,6	1,8974	15	0,17	0,83
5	4,5	2,1213	20	0,08	0,92
6	5,4	2,3238	25	0,015	0,98

Los resultados de los análisis del cloro residual usando el hipoclorito de sodio y el hipoclorito de calcio para las dosificaciones seleccionadas se muestran en las Tablas 3 y 4 respectivamente.

Tabla 3. Resultados del método yodimétrico para el hipoclorito de sodio

# de la muestra/ Dosificación	4 ppm	6 ppm	8 ppm	10 ppm	12 ppm
1	0,9217	1,6307	2,1979	2,6942	2,9778
2	1,0635	1,7725	2,2688	2,5524	2,9069
3	0,9926	1,6307	2,1270	2,5524	3,0487
4	0,9926	1,7016	2,1270	2,6233	2,9778
5	0,9217	1,5598	2,0561	2,4815	3,1196
6	1,0635	1,7016	2,1979	2,6233	3,0487

Tabla 4. Resultados del método yodimétrico para el hipoclorito de calcio

# de la muestra/ Dosificación	4 ppm	6 ppm	8 ppm	10 ppm	12 ppm
1	1,0635	1,5598	2,0561	2,5524	3,0487
2	0,9217	1,7016	2,1270	2,6942	2,9778
3	0,9217	1,6307	2,1979	2,6233	3,1196
4	0,9926	1,5598	2,1270	2,5524	2,9778
5	1,0635	1,7016	2,1979	2,4815	3,1196
6	0,9926	1,6307	2,0561	2,6233	3,0487

La diferencia entre los experimentos para las concentraciones entre los agentes químicos es baja y considerando que los análisis fueron realizados en diferentes momentos se justifica que no se tomara en cuenta para el diseño la formación de bloques. Mediante una inspección visual se puede comprobar que la dosificación para obtener un cloro residual igual a 2 ppm se encuentra entre los 6 y 8 ppm.

Los resultados del análisis de regresión para determinar el modelo matemático que mejor ajustaba los datos se muestra en la Figura 1. Para ambos casos el coeficiente de determinación R^2 superó el 99 % lo que resulta satisfactorio. Sustituyendo el valor del cloro residual en 2 ppm en los modelos se calculó entonces la dosificación óptima de hipoclorito de sodio e hipoclorito de calcio para la desinfección del residual obteniéndose los valores de 7,393 ppm y 7,427 ppm respectivamente. Estos valores sirven además como referencia para estimar la dosificación en caso que se utilicen otros productos clorados tomando en consideración la equivalencia en poder oxidante de otros productos.

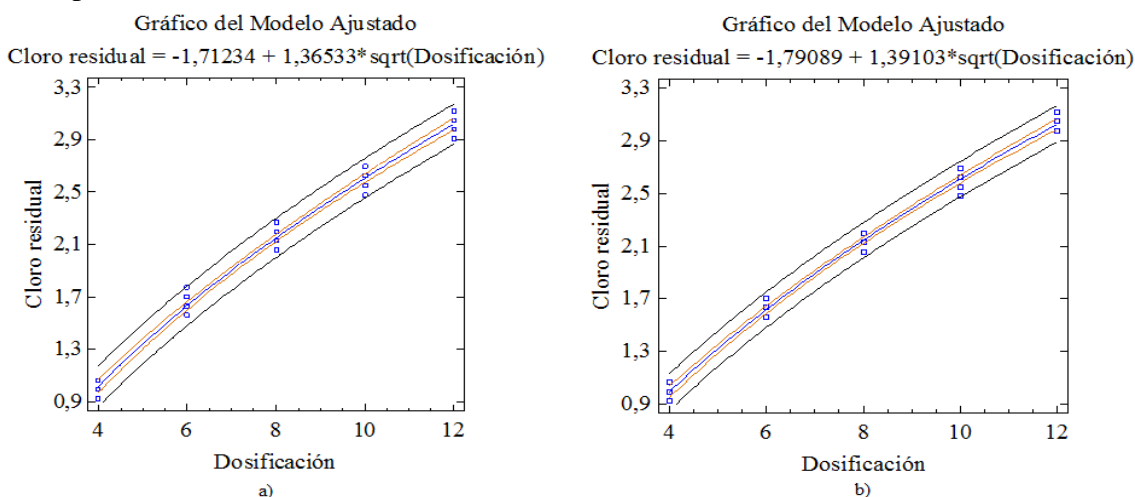


Figura 1. Modelo ajustado a) hipoclorito de sodio b) hipoclorito de calcio

Metcalf y Eddy (2014) recomiendan que para un residual proveniente de un tanque séptico, con una cantidad de coliformes en el rango de 10^7 - 10^9 NMP/100 mL y con un estándar de calidad para el vertimiento de 200 colonias por cada 100 ml de agua la dosificación de cloro oscila entre 30-60 mg/L. Sin embargo, como la cantidad de coliformes fecales del residual considerado era menor tributó en una menor dosificación requerida. Este resultado indica que el tratamiento en el tanque séptico de la fábrica es eficiente pero no suficiente para controlar el parámetro de los coliformes fecales dentro de los límites de la norma NC 521: 2007.

3.2. Dimensionamiento del sistema y aspectos económicos

Como se desea minimizar el ancho (a) y el largo del sistema (L) se construyó una función ponderada determinando la importancia (pesos) de las variables mediante consulta a los decisores de la entidad. Para el dimensionamiento se plantea entonces el problema de optimización multiobjetivo de la ecuación 5.

$$\begin{aligned} & \min(0,75 \cdot a + 0,25 \cdot L) \\ & 3 \cdot a \cdot L \cdot h = 14,4 \\ \text{sa:} \quad & 0 < a \leq \frac{4}{3} \\ & 0 < h \leq 1,2 \\ & L > 0 \end{aligned} \tag{5}$$

Resolviendo la ecuación 5 se obtiene que el ancho=1,547 m, la profundidad=1,2 m y la longitud=3,4641 m son aproximadamente las dimensiones óptimas de compromiso. Dado que el volumen total del sistema es $14,4 \text{ m}^3$ el costo aproximado de acuerdo a la ecuación 4 tomando como base el año 2012 es de 227,8 dólares estadounidenses. Este debe ser actualizado en caso de que se decida realizar el proyecto usando un índice de costo.

Considerando que el flujo a tratar es de $14,4 \text{ m}^3/\text{día}$ la cantidad diaria de hipoclorito de sodio a consumir es de 0,8872 kg/día (0,8872 L/día) y de hipoclorito de calcio de 0,1645 kg/día (0,0001645 t/día). Entonces con los precios de la Tabla 1, dado que un año tiene 365 días se estimó que el costo de operación anual es de aproximadamente 3252,2 \$ para el hipoclorito de sodio y 3733,3 \$ para el hipoclorito de calcio.

El hipoclorito de sodio a pesar de ser menos costoso que el hipoclorito de calcio, es mucho más inestable y no se recomienda su almacenamiento para períodos muy largos. Como la cantidad anual que se consume en el proceso es bastante baja y como no se puede almacenar por tanto tiempo sin que pierda sus propiedades, el costo en transporte para su adquisición de forma regular aumentaría el costo total para su uso como desinfectante.

Por lo anterior se recomienda emplear hipoclorito de calcio en vez de hipoclorito de sodio para la desinfección, lo que de acuerdo a Metcalf y Eddy (2014) resulta común para pequeñas instalaciones dado que su manejo es relativamente sencillo por los operadores. No obstante, se recomienda además establecer un monitoreo del cloro residual a la salida de las cámaras de contacto para asegurar que la dosificación sea la correcta en caso de que perturbaciones como el cambio en la composición del residual desvíen al sistema del modelo supuesto para su diseño. Además, se consideró el comportamiento de flujo pistón, pero existen factores como la distribución de tiempos

de residencia (RTD) y la eficiencia del mezclado que pueden influir en el desempeño del sistema. Los trabajos de (Levenspiel 1999), (Levenspiel, 2011) y (Paul et al., 2004) son esclarecedores en este sentido.

CONCLUSIONES

1. Mediante un adecuado diseño de experimentos no solo se puede determinar la dosificación óptima para la desinfección, sino que permite ahorrar reactivos y tiempo en la investigación, manteniendo la confiabilidad estadística.
2. A pesar de ser más costoso se recomienda el uso del hipoclorito de calcio para la desinfección del residual sanitario de la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos. La dosificación óptima para el proceso es de 7,427 ppm para dar un costo anual para la dosificación de 3733,3 \$.

REFERENCIAS

- Bitton, G., Wastewater microbiology., John Wiley & Sons, 2005, pp. 155-156.
- CONAGUA., Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento., Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, 2007, pp. 36-37.
- Couper, J. R., Penney, W.R., Fair, J. R., y Walas, S.M., Chemical Process Equipment- Selection and Design., 3th Edition, Gulf Professional Publishing, United States of America, 2012, pp. 739-740.
- LeChevallier, M.W., y Au, K.K., Water treatment and pathogen control. Process efficiency in achieving safe drinking water., World Health Organization & IWA Publishing, United Kingdom, 2004, pp. 41-42.
- Levenspiel, O., Chemical reaction engineering., 3th Edition, John Wiley & Sons, United States of America, 1999, pp. 257-365.
- Levenspiel, O., Tracer technology: modeling the flow of fluids., Springer Science & Business Media, 2011, pp. 35-112.
- Metcalf, E., y Eddy, M., Wastewater engineering: treatment and resource recovery., (G. Tchobanoglous, H. D. Stensel, R. Tsuchihashi & F. Burton Eds. 5 ed.), New York, USA: McGraw-Hill Education, 2014, pp. 1314-1331.
- Montgomery, D.C., Design and analysis of experiments., 8th Edition, John Wiley & Sons, United States of America, 2012, pp. 105-108.
- NC 521:2007, Vertimiento de las aguas residuales a la zona costera y aguas marinas- Especificaciones., Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba, 2007, pp. 1-14.
- Patnaik, P., Handbook of Environmental Analysis: Chemical Pollutants in Air, Water, Soil and Solid Wastes., 3th Edition CRC Editorial, United States of America, 2018, pp. 51-55.
- Paul, E.L., Atiemo, V.A., and Kresta, S.M., Handbook of Industrial Mixing., John Wiley & Sons Editorial, United States of America, 2004, pp. 1-143.
- Shammas, N.K., y Wang, L.K., Water engineering: hydraulics, distribution and treatment., John Wiley & Sons Editorial, United States of America, 2016, pp. 546-547.
- Spellman, F.R., Handbook of water and wastewater treatment plant operations., 3th

Edition, CRC Press Editorial, United States of America, 2014, pp. 161-162.
White, G.C., Handbook of chlorination and alternative disinfectants., 5th Edition, John Wiley & Sons Editorial, New York, 2010, pp. 382-384.