

Investigación

Metodología para el diseño de un biorreactor secuencial

Methodology for the Design of a Sequential Bioreactor

Recibido: 12 de junio de 2017 - Aceptado: 20 de junio de 2017

Para citar este artículo: P. Martínez, C. Calderón, C. Ruiz «Metodología para el diseño de un biorreactor secuencial», Ingenium, vol. 18. n.º 36, pp. 11-25, junio, 2017».



Pedro Nel Martínez Henao*.
Camilo Alejandro Calderón Casallas**.
Camila Andrea Ruiz Ortiz***

Resumen

El artículo presenta la metodología de diseño de un Biorreactor secuencial SBR requerido en el proceso de tratamiento de aguas residuales. El proceso aeróbico empleado ayuda a la oxigenación del agua para que las bacterias realicen la degradación y procesamiento de material particulado y generen los lodos activados, que es un material que puede ser reutilizado para compostaje en procesos de agricultura orgánica. La medición de PH en el agua ayuda al control de bacterias que se hace mediante el suministro de aire y/o levadura en el agua. El proyecto es desarrollado con la participación de estudiantes de los programas de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Industrial, adscritos al semillero de investigación SIDI en el marco del proyecto de iniciación científica PIC-ING-2252, financiada por la *Universidad Militar Nueva Granada* [UMNG].

La metodología de diseño a emplearse en el diseño del SBR es la expuesta por Arzola [1] y Martínez [2], abordando inicialmente la matriz de despliegue de función de calidad (QFD), en el que se registran inicialmente los requerimientos del cliente para poderlos traducir a las especificaciones técnicas de ingeniería: posteriormente se desarrolla el diseño conceptual (caja gris), donde se plantean alternativas que dan cumplimiento a los

* Ingeniero Mecánico, Magister en Automatización Industrial, profesor Asociado tiempo completo en la Universidad Militar Nueva Granada, campus Cajicá, Programa Ingeniería Industrial. E-mail: Pedro_martinez@unimilitar.edu.co

** Estudiante de Ingeniería Industrial, Universidad Militar Nueva Granada. E-mail: u5800125@unimilitar.edu.co

*** Estudiante de Ingeniería Industrial, Universidad Militar Nueva Granada. E-mail: u5800141@unimilitar.edu.co

requerimientos y a las especificaciones técnicas de ingeniería. Seleccionada la alternativa más viable, se procede al modelamiento, cálculo y selección de componentes a ser utilizados en el concepto seleccionado como alternativa de desarrollo. Finalmente, se realiza la ingeniería de detalle mediante modelamiento CAD.

Palabras clave:

Biorreactor, agua residual, compuestos orgánicos, diseño, metodología, función de calidad.

Abstracts

The article presents the design methodology of a sequential Bioreactor (SBR) required in the process of wastewater treatment. The aerobic process employed helps the oxygenation of the water so that the bacteria perform the degradation and processing of particulate matter and generate the activated sludge, which is a material that can be reused for composting in organic farming processes. Measuring PH in water helps control bacteria that is made by supplying air and / or yeast into the water. The project is developed with the participation of students from the Environmental Engineering and Industrial Engineering programs, assigned to the SIDI research seed in the framework of the PIC-ING-2252 scientific initiation project, funded by the *New Granada Military University*.

The design methodology to be used in the design of the SBR is that presented by Arzola [1] and Martinez [2], initially addressing the quality function deployment matrix (QFD) in which the customer's requirements are initially recorded in order to translate them to the technical specifications of engineering, later the conceptual design (gray box) is developed where alternatives are proposed that fulfill the requirements and technical specifications of engineering. Once the most viable alternative has been selected, we proceed to the modeling, calculation and selection of components to be used in the selected concept as an alternative development. Finally, detailed engineering is done using CAD modeling.

Key words:

bioreactor, waste water, organic compounds, design, methodology, quality function.

1. Introducción

El tratamiento y reutilización de aguas residuales es una opción pertinente a la conservación del medio ambiente, lo que pone en evidencia la necesidad de buscar estrategias que permitan control de los vertimientos de aguas residuales y rentabilidad de inversión que facilite a los usuarios su implementación en procesos para generar subproductos que puedan ser reutilizados en nuevos procesos de agricultura, minimizando el impacto ambiental.

1.1. Justificación

El interés en eliminar contaminantes de las aguas residuales se ha incrementado en los últimos años y es una exigencia de los organismos de control velar por que las aguas de procesos industriales, viviendas y procesos agro-industriales sean manejadas adecuadamente. Sobre la base de las consideraciones anteriores, el decreto 1594 de 1984 establece la norma que declara las condiciones y los compuestos permitidos del vertimiento de líquidos para el manejo de aguas superficiales, subterráneas y marinas.

Existe una constante búsqueda de nuevos y mejores diseños que permitan la implementación de sistemas de tratamiento confiables, de bajo costo y que ofrezcan mejores resultados [3]. Esta tarea es realmente un reto, debido a la generación de múltiples tipos de vertimientos líquidos, con diferentes características y composición química. Por lo tanto, se requiere un SBR que controle la eliminación de nutrientes y materia orgánica según la diversidad de aguas residuales, tanto domésticas como industriales [4].

En el siglo XXI el manejo óptimo de los recursos hídricos es primordial, ya que las actividades humanas se han convertido en un factor importante de presión sobre la disponibilidad y calidad del agua. [5]

Según la CAR el tratamiento de aguas residuales en los municipios aledaños a la ciudad de Bogotá debe ser mejorado teniendo en cuenta que no solo se busca disminuir la carga contaminante en la cuenca, sino que también se busca incrementar la biodiversidad de la región que circunda al río Bogotá. [6]

Sin embargo, son pocas las instituciones involucradas con el tratamiento de las aguas residuales y que aún no incorporan esta práctica por las siguientes razones:

- No existe conciencia del enfoque integral del manejo de las aguas residuales para alcanzar el desarrollo sostenible.
- La poca participación de la comunidad en la elección de tecnologías apropiadas para tratar las aguas residuales, que permita a las empresas adoptar tecnologías de alto costo y que no logran las exigencias de calidad sanitaria requeridas para su reúso.
- La legislación sobre tratamiento de aguas residuales y especialmente sobre uso de este recurso es aún muy limitado en la mayoría de países de América latina. [7]

Teniendo en cuenta la cercanía que tiene la *Universidad Militar Nueva granada*, sede campus con el Río Bogotá y los humedales aledaños, es fundamental buscar alternativas para el manejo de aguas residuales, que contribuyan a la recuperación del río y el medio ambiente.

1.2. Marco teórico

1.2.1. Base de diseño

Para la base de diseño del biorreactor secuencial se tienen en cuenta modelos y datos de la zona en la cual se pretende implementar este proyecto; para esto, se tienen en cuenta los parámetros exigidos por la CAR lo cual es base fundamental para el desarrollo del SBR y se toma como referencia la planta de tratamientos de aguas residuales (PTAR) de la *Universidad Militar Nueva Granada*.

En la tabla 1 se muestra los datos los datos establecidos por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) para el vertimiento de aguas residuales a un cuerpo de agua del territorio.

Tabla 1. Parámetros exigidos por la CAR

Ítem	Parámetro	Niveles avalados
1	DB05	< 80%
2	Sólidos Suspendidos Total	< 80%
3	Grasas y Aceites	< 80%
4	pH	5 a 9
5	Temperatura	14<T< 21o C
6	Material flotante	Ausente

Fuente: Tabla tomada del ministerio de salud pública decreto 1595 de 1995 [8]

La *Universidad Militar Nueva Granada*, sede campus, cuenta con su propia planta de tratamiento de aguas residuales, que en su primera fase se construyó para una población de 3000 personas; este proyecto se genera a partir del compromiso de la universidad para la preservación del medio ambiente.

La tabla 2. Corresponde las condiciones básicas de diseño entregadas por la planta de tratamiento PTAR de la UMNG, ubicada en la ciudad de *Cajicá*.

Tabla 2. Condiciones de diseño de la PTAR, UMNG

PARAMETRO	MODULO UNITARIO	MODULOTOTAL
No de estudiantes	3110	9330
Dotación	69.45	69.46
Caudal medio diario	9.0 m3/h	27.0 m3/h
Caudal medio	2.5 m3/h	7.5 m3/h
Carga Orgánica	0.05 Kg/est	466.5 kg/día
DB05 entrada	250 mg/l	250 mg/l
DB05 salida	37 mg/l	37 mg/l
A.S.N.M	2545	2545
Temperatura media mensual Mínima del agua	15 oC	15 oC

Fuente: Tabla suministrada por aguas de Colombia Ltda. [9]

1.2.2. Requerimientos técnicos de ingeniería y criterios de selección para el diseño del SBR.

Corresponde a los factores necesarios, importantes y deseables para abordar las alternativas de diseño que permitan identificar las condiciones que debe cumplir el diseño del SBR, que convierte el problema en objetivos medibles y verificables. Es decir, los requerimientos técnicos pueden ser de tipo cuantitativo o cualitativo, que se establecen con base en la definición del problema. En síntesis, el requerimiento no describe la solución, sino que da las pautas para empezar y evaluar los resultados [9].

1.2.3. Despliegue de la función de calidad QFD

Es un método de gestión de calidad basado en convertir las necesidades del usuario en la calidad del diseño, generar las funciones que contribuyen a mejorar la calidad e implementar técnicas para lograr calidad del diseño en subsistemas y componentes, y en última instancia aportar a la mejora de los elementos. [10], [11]

El QFD integra las necesidades de información requeridas por el equipo de desarrollo de productos, que se canalizan para comprender la voz del cliente y traducirla a la voz del ingeniero.

Gráfica 1. Casa de la calidad QFD.



Fuente: Arzola [1]

Dentro de este orden de ideas se establecen los siguientes requerimientos del usuario necesarios para el diseño del SBR.

- Control adecuado en el crecimiento de microorganismos: 2-3 kg/m³ – DQO

1.2.5. Diseño conceptual

Esta fase de diseño genera y evalúa los conceptos de calidad del producto e identifica los procesos a desarrollarse en el producto o proceso; luego concibe las posibles alternativas de solución que satisfagan los requerimientos técnicos de ingeniería y finalmente se hace una selección de alternativas a desarrollar en detalle.

La importancia de emplear un proceso estructurado para esta fase de diseño es que disminuye el riesgo de cometer errores que se verán reflejados en el producto final.

Algunos de los errores que pueden evitarse en esta fase de diseño son:

- Considerar insuficientes alternativas de solución a los problemas parciales de diseño.
- No evaluar cuidadosamente la utilidad de conceptos ajenos.
- Participar de pocas personas en el proceso de búsqueda.
- Integrar ineficazmente soluciones parciales prometedoras.
- Omitir algunas categorías de soluciones prometedoras.

En la gráfica 3, se presenta la descomposición funcional de todo el sistema de operación requerido en el SBR, en la parte intermedia se registra el rango de la variable a controlar y en la columna final se reconoce el equipo, sensor o controlador que ejecutara dicha intervención.

Gráfica 3. Descomposición funcional - Caja Gris

DESCRIPCIÓN DE OPERACIÓN O FUNCIONAMIENTO		Nivel alto	Nivel bajo	$2 < P_h \leq 10$	$P_h < 5$	$P_h > 5$	SOPORTE
El operador del equipo acciona el interruptor de arranque de operación del sistema	STAR						STAR en Tablero de control
Se verifica nivel de agua residual en el reactor	SENSOR NIVEL						SENSOR de nivel Ref:
Para un nivel alto, se pone manual o automáticamente el llenado del tanque		STOP					Se dispara contacto en el tablero de control para Stop bomba de llenado
Para un nivel bajo, se arranca operación de la bomba de llenado	STAR						Se dispara contacto en el tablero de control para Star bomba de llenado
			BOMBA DE LLENADO				Bomba inicia operación de llenado
La operación del Ph metro debe estar operando: $2 < P_h \leq 10$				PH METRO			Ph Metro
La operación del Dosificador de levadura estar operando: $3.5 \leq P_h \leq 5.5$					DOSIFICADOR DE LEVADURA		Se dispara contacto en el tablero de control para Star temporizado Dosificador levadura
La operación del Dosificador de bacterias (solo activado) estar operando: $6.0 \leq P_h \leq 7.5$					DOSIFICADOR DE BACTERIAS (Solo Activado)		Se dispara contacto en el tablero de control para Star temporizado Dosificador Bacterias (Solo activado) y activación del compresor de aire

Fuente: Elaboración propia 2017

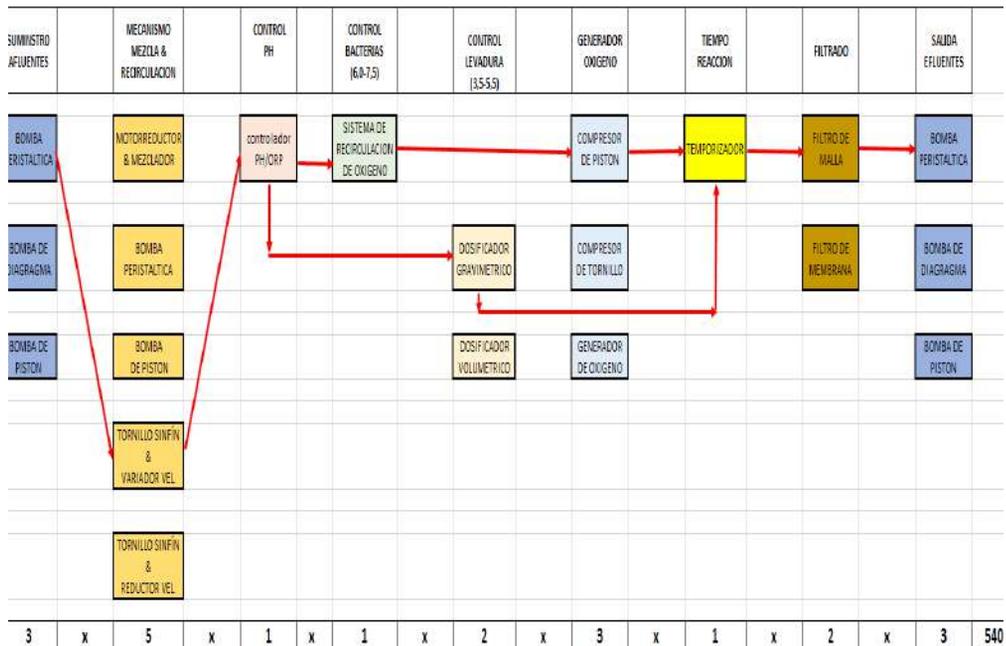
En la gráfica 4 se despliega la combinación de conceptos; para cada variable pueda ser controlada hay una serie de posibles alternativas; el producto de todas las alternativas para las variables a ser controladas genera las combinaciones potenciales que pueden darse

para satisfacer el diseño final del SBR. Por lo tanto, el procedimiento para la evaluación y selección de conceptos puede elegirse de una manera rigurosa como lo es ponderar los criterios de selección y el nivel de importancia de la variable a ser controlada o mediante la selección del concepto global dominante:

- Decisión externa
- Decisión del líder
- Basado en la intuición
- Votación múltiple de los miembros del equipo
- Basado en un listado de ventajas y desventajas de cada concepto
- Prototipado y pruebas de las alternativas

Para el caso de estudio, de las 540 posibles alternativas de diseño que arroja la combinación de conceptos, se selecciona la alternativa resaltada con línea roja por costos, por integración de procesos en una sola fase como es la oxigenación y recirculación del fluido en el tanque de mezcla y por la facilidad de filtrado con un sistema auto limpiante.

Gráfica 4. Combinación de conceptos



Fuente: Elaboración propia 2017

2. Generación detallada del producto

Interpretados los requerimientos del cliente y determinando las propiedades de diseño que deben cumplir todas y cada uno de los componentes del sistema, se consigue un

concepto de producto suficientemente fuerte. En consecuencia, la selección de componentes debe hacerse según la estandarización disponible en el mercado. Ahora bien, las secuencias de actividades en el proceso de diseño son: evaluación del producto; mejora de materiales y técnicas de producción a emplear; y optimización de las formas de los componentes.

2.1. Cálculos tornillo sin fin [12]

A continuación, se muestran los cálculos pertinentes para conocer con qué tipo de motor puede operar el sistema dadas las condiciones de Bogotá, dado que la altura y condiciones climáticas son similares a las que se encuentran en el municipio de Cajicá, Cundinamarca donde se desea implementar el modelo.

$$Q = 3600 * s * v * \gamma * k \quad (1)$$

Donde:

Q: Flujo de material (t/hr)

S: área del tornillo (m²)

V: velocidad de transporte (m/s)

γ : Densidad material (1.02 t/m³)

K: coeficiente de disminución de flujo (1 para flujo horizontal)

$$s = \lambda * \frac{\pi}{4} * (D - d)^2 \quad (2)$$

Donde:

λ : Tipo de carga, 0,32 para carga poco abrasiva

$$s = 0,32 * \frac{\pi}{4} * (100 - 25,4)^2 = 1399 \text{ mm}^2 = 1,4 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 1399 \text{ mm}^2 = 1,4 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$v = n * p \quad (3)$$

Donde:

v: Velocidad de transporte del material (m/s)

n: Velocidad de giro del tornillo (Rad/s): 150 Rpm = 15,7 rad/s

p: Paso (m): 0,04 m

$$v = 15,7 * 0,04 = 0,63 \text{ m/s}$$

Reemplazando en (1)

$$Q = 3600 * 1,4 \times 10^{-3} * 0,63 * 1,02 * 1 = 3,2 \text{ t/hr}$$

Potencia de accionamiento

$$P_t = P_h + P_n + P_s \quad (4)$$

$$P_h = C_o * Q * L * g \quad (5)$$

Donde:

C_o = Coeficiente de resistencia del material = 4

Q: flujo

L: longitud del sistema a transportar

$$P_h = 4 * \frac{3200 \text{ Kg}}{3600 \text{ s}} * 5 \text{ m} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 174,2 \text{ watt} = 174,2 \text{ watt}$$

$$P_n = \frac{D * L}{20} \quad (6)$$

$$P_n = \frac{0,1 * 5}{20} = 0,025 \text{ KW} = 25 \text{ Watt}$$

$$P_s = 50\% P_h = 87,1 \text{ watt}$$

$$P_t = P_h + P_n + P_s = 174,2 + 25 + 87,1 = 286,3 \text{ watt}$$

Teniendo en cuenta pérdidas del 25% para una altura de Bogotá tenemos

$$P_t = 358 \text{ watt} = 0,5 \text{ hp}$$

El sistema puede operar con un motor de ½ hp

2.2. Calculo sistema de filtrado

La filtración del agua es uno de los procesos más importantes para mantener el vaso (y todo su circuito) limpio, por lo que la elección del equipo de filtrado es primordial. Teniendo en cuenta las características de construcción, el cálculo del equipo de filtración más adecuado se tiene en cuenta los parámetros a manejar, la elección de los materiales y equipos a utilizar en el tratamiento del agua.

$$SF = \frac{Q}{VF} \quad (7)$$

$$Q = \frac{V}{t} \quad (8)$$

Donde:

SF: superficie de filtración (m²)

Q: Caudal (m³/h)

VF: Velocidad de filtración

V: volumen del tanque (m³/h/m²)

t=tiempo de recirculación (h)

$$SF:(2\pi R)L=(2\pi 0.06)1.170=0,44 \text{ m}^2$$

$$VF = \frac{Q}{SF} = \frac{3.2}{0.44} = 7.27 \frac{\text{m}^3/\text{h}}{\text{m}^2}$$

Para el sistema de filtrado se empleará una malla en acero inoxidable mesh 250 lo cual permite una velocidad adecuada de filtración.

2.3. Análisis de costos

Flujo neto de caja

Se entiende por **flujo de caja** las entradas y salidas de **caja o efectivo**, en un período dado. El **flujo de caja** es la acumulación neta de activos líquidos en un periodo determinado y, por lo tanto, constituye un indicador importante de la liquidez de una empresa.

Tabla 3. Flujo neto de caja

			15,0%	12	\$300	12,0%			35%			
			Perido	Inversión	Ventas/Kg	Ingreso	CAO	Nómina	Depreciación	Base	Impuesto	FNC
Maquinaria y Equipos	\$15.000	Nueva										
Vida útil	5	años	0	\$15.000	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	-\$15.000
Depreciación	4	años										
Cantidad a producir	12	Und/año	1	\$0	\$3.500	\$42.000	\$21.000	\$17.000	\$3.750	\$250	\$88	\$3.913
Precio de venta	\$3.500	Und (US)	2	\$0	\$4.025	\$48.300	\$21.300	\$19.040	\$3.750	\$4.210	\$1.474	\$6.487
Incremento	15%	anual	3	\$0	\$4.629	\$55.545	\$21.600	\$21.325	\$3.750	\$8.870	\$3.105	\$9.516
Costo anual de producción	\$21.000	anual (US)	4	\$0	\$5.323	\$63.877	\$21.900	\$23.884	\$3.750	\$14.343	\$5.020	\$13.073
Incremento en costos	\$300	anual (US)	5	\$0	\$6.122	\$73.458	\$22.200	\$26.750	\$0	\$24.508	\$8.578	\$15.930
Nómina anual	\$17.000	Primer año									TIO:	38,0%
Incremento nómina	12,0%	anual									TIR:	42,8%
Gerente	\$8.000	(US)/año									VPN:	\$1.690
Empleados Producción	\$8.000	(US)/año										
Tasa impuestos	35%	año										
Tasa Interes Oportunidad (TIO)	38%	año										

Fuente: Elaboración propia 2017

Estado de Resultados

El estado de resultados (PYG) busca determinar la utilidad que produce la inversión en el proyecto, es de aclarar que los gastos que se registran en él no siempre han ocurrido como

desembolsos. Además, registra todos los gastos, incluido los financieros. Así, por ejemplo, se registra la depreciación, aunque el desembolso por el pago del activo haya ocurrido años atrás; se registran las ventas realizadas, aunque estas hayan sido a crédito y no estén pagadas por los clientes. El PYG determina entonces el monto de la utilidad contable, la cual podrá ser repartida a los propietarios dependiendo de la disponibilidad de efectivo [13].

Tabla 4. Estado de Resultados (PyG)

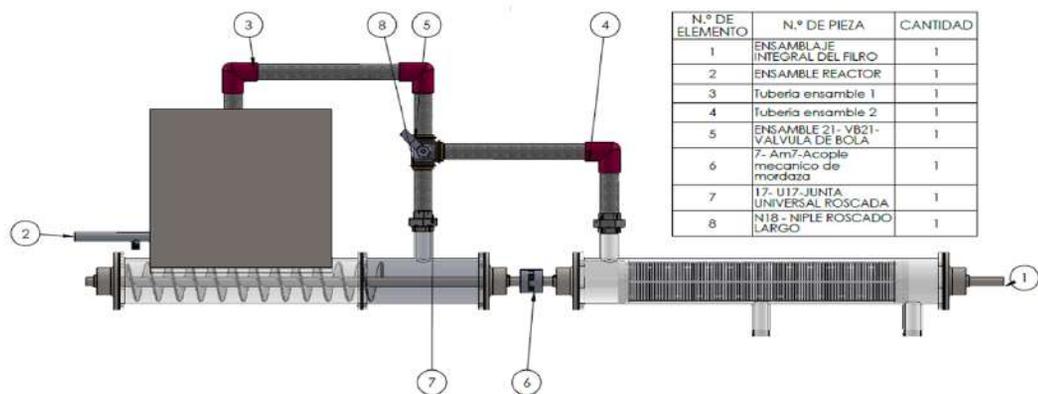
Estado de Resultados						
Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingreso por ventas	\$0	\$42.000	\$48.300	\$55.545	\$63.877	\$73.458
Costo de Maquinaria	\$15.000	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Costo anual de Producción	\$0	\$21.000	\$21.300	\$21.600	\$21.900	\$22.200
Nómina de Producción	\$0	\$9.000	\$10.080	\$11.290	\$12.644	\$14.162
Depreciación	\$0	\$3.750	\$3.750	\$3.750	\$3.750	\$0
Total egresos	\$0	\$33.750	\$35.130	\$36.640	\$38.294	\$36.362
Utilidad Bruta	\$0	\$8.250	\$13.170	\$18.905	\$25.582	\$37.097
Gastos Operativos	\$0					
Nómina de Gerente	\$0	\$8.000	\$8.960	\$10.035	\$11.239	\$12.588
Utilidad Operativa	-\$15.000	\$250	\$4.210	\$8.870	\$14.343	\$24.508
Utilidad Antes de Impuestos	\$0	\$250	\$4.210	\$8.870	\$14.343	\$24.508
Impuestos	\$0	\$88	\$1.474	\$3.105	\$5.020	\$8.578
Utilidad despues de Impuestos	\$0	\$163	\$2.737	\$5.766	\$9.323	\$15.930
Depreciación	\$0	\$3.750	\$3.750	\$3.750	\$3.750	\$0
Flujo Neto de Caja	-\$15.000	\$3.913	\$6.487	\$9.516	\$13.073	\$15.930
					TIO:	38,0%
					TIR:	42,8%
					VPN:	\$1.650

Fuente: Elaboración propia 2017

3. Resultados

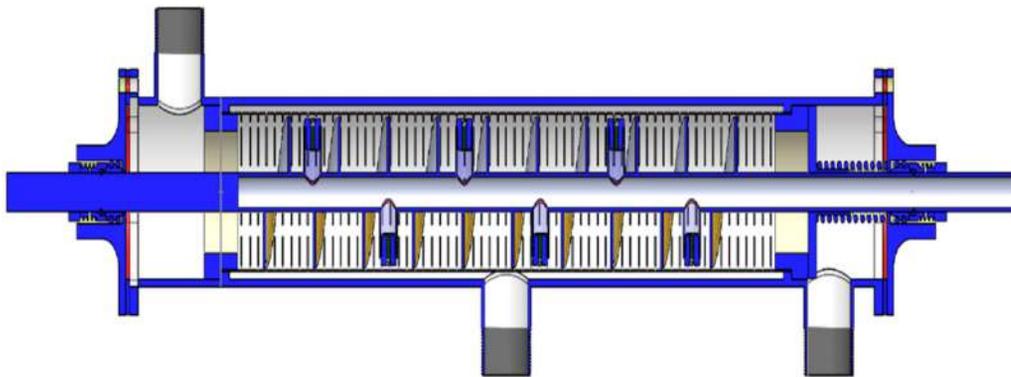
La gráfica 5 muestra en conjunto el ensamble integral de todo el sistema del SBR.

Gráfica 5. Biorreactor secuencial SBR-PC225



Fuente: Elaboración propia 2017

Gráfica 6. Ensamble integral del filtro auto limpiante



Fuente: Elaboración propia 2017

- El empleo del Solid Works permite obtener una representación gráfica detallada de los componentes que integran el SBR. Para el análisis estructural e hidráulico, se puede recurrir a la simulación de elementos finitos el cual permite verificar el comportamiento estructural de las partes y mediante CFD fluent se puede hacer el análisis del comportamiento hidráulico del sistema.
- El diseño del sistema de auto limpieza en el filtro hace que no se requiera clarificadores externos, debido a que la separación de sólidos y clarificación del efluente tratado ocurren en el filtro.
- La dosificación por tornillo sin fin hace que el sistema de reacción y filtrado pueda intervenir la velocidad de giro del tornillo el cual puede ser controlado por un motor eléctrico y variador de velocidad. El requerimiento en la dosificación es directamente proporcional a la velocidad del motor. Este sistema puede estar funcionando de manera intermitente o continua. [14]

Ventajas del diseño del SBR frente a otras tecnologías se muestran en la tabla 5. [15]

Tabla 5. Ventajas del SBR frente a otras tecnologías

Parámetro	SBR	Otras tecnologías
DBO	< 10 ppm	< 20 ppm
Sólidos suspendidos (SST)	< 10 ppm	< 30 ppm
Nitrógeno total	< 10 ppm	No hay tratamiento
Fósforo total	< 1 ppm	No hay tratamiento

Fuente:

El material seleccionado para la construcción del SBR ha sido el acero inoxidable (304/316/316L) se decide en función de los niveles de cloruro en el agua residual, el tornillo sin fin puede seleccionarse en material de poliuretano, silicona, teflón, EPDM. El

sistema de aireación y medio filtrante puede también fabricarse en acero inoxidable 316, el cual da excelentes condiciones químicas y mecánicas de resistencia.

- Al hacer la sensibilización del flujo neto de caja se observa que la variable más sensible el porcentaje de incremento de venta la cual no puede ser inferior al 13.3% y la cantidad estimada de producción. Si bien la tasa interna de retorno (TIR) es superior a la tasa de interés de oportunidad (TIO), por lo menos deja claro a los inversionistas que la operación de este tipo de plantas no deja pérdidas a las empresas que se acojan al cumplimiento de las normas reglamentarias para el manejo y tratamiento de aguas residuales.

4. Discusión y conclusiones

El prototipo diseño del SBR propuesto es un sistema de tratamiento que permite obtener un efluente más apropiado para fines de reúso o sistema de riego que mejoran las condiciones de suelo en la zona de ubicación del campus universitario debido a la generación de lodos secundarios «estabilizado», que al igual que los sistemas convencionales, pueden ser aprovechados como fertilizantes para mejora de los suelos.

Son diversos los diseños de SBR genéricos que se han mejorado y los procesos de operación han sido patentados por diferentes empresas de tecnología; por lo tanto, esta es una oportunidad que puede aprovechar la UMNG en el financiamiento del desarrollo del proyecto PIC 2252, bajo el cual fue concebido este proyecto. Como proyecto de inversión para su comercialización, cualquiera sea la escala de la planta a instalar, el proyecto deja una TIR del 42,8% frente a un TIO que ofrece el sistema bancario del 38%. Ahora bien, si la inversión se hace como el tratamiento debe cumplir, la universidad como empresa que debe cometer con los parámetros de higiene y vertimiento de aguas residuales, la inversión y sostenimiento de la planta no representa más del 0,1% de los ingresos generados por la institución anualmente, lo que hace también muy sostenible el poder dar cumplimiento a los requerimientos exigidos por los organismos de control ambiental.

El SBR no es aplicable a todo tipo de efluente orgánico, la presencia de compuestos tóxicos puede afectar negativamente el desempeño de este tipo de tratamiento. Debe tenerse en cuenta que la biomasa generada en el proceso completa la degradación del DBO en las aguas residuales, así como la conversión del amoníaco en nitratos.

Para evitar taponamiento en las boquillas de aireación en el reactor o en las boquillas de lavado del filtro durante los ciclos operativos específicos, se requiere un accionamiento regular y controlado para asegurar su correcto funcionamiento.

Referencias

- [1] N. Arzola de la Peña, Metodología de diseño para ingeniería, vol. 4, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2011, p. 468.
- [2] P. N. Martínez Henao, «Propuesta metodológica para el diseño de un banco de pruebas para engranajes cilíndricos rectos,» Prospectiva, vol. 10, n.º 2, pp. 64-73, 2012.

- [3] J. F. Muñoz Paredes y M. Ramos Ramos, «Reactores discontinuos secuenciales: Una tecnología versátil en el tratamiento de aguas residuales,» *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 24, nº 1, pp. 49-66, 2014.
- [4] J. Moreno y G. Buitrón, «Optimización de un biorreactor Aerobio para el tratamiento de aguas residuales Industriales,» *Computación y Sistemas*, pp. 74-82, 2002.
- [5] UNESCO, «Recursos Hídricos,» *GreenFacts*, 2009.
- [6] El tiempo, «Cuatro municipios hacen la tarea para sanear el río Bogotá,» *El tiempo*, 3 Noviembre 2015.
- [7] CEPIS-Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, «Proyecto Regional. Sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en América Latina-Realidad y Potencial,» CEPIS, Lima, Perú, 2004.
- [8] T. M. D. Leandro, «Caracterización microbiológica del agua residual de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), ubicada en el campus de la Universidad Militar Nueva Granada, Cajica,» *Universidad Militar, Cajicá*, 2011.
- [9] SENA-TecnoParque, «Listado de requerimientos-SlideShare,» 9 Noviembre 2015. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/37942035/LISTADO-DE-REQUERIMIENTOS>.
- [10] R. Arturo y R. Falco, «Despliegue de la función de calidad,» 04 2009. [En línea]. Available: web.cortland.edu/matresearch/QFD.pdf.
- [11] J. Gyungmi, J. Yujin y Y. Byungun, «Technology-driven roadmaps for identifying new product/market opportunities: Use of text mining and quality function deployment,» *Advanced Engineering informatics*, vol. 29, pp. 126-138, 2015.
- [12] Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III, «Tornillo sin fin,» *Depto Ingeniería, Madrid*, 2009.
- [13] [J. Del Carpio Gallego y R. Eyzaguirre Tejada, «Análisis de riesgo en la evaluación de alternativas utilizando Crystal Ball,» *Gestión y Producción*, vol. 10, nº 1, pp. 55-59, 2007.
- [14] G. T. E. Marcelo, «Diseño y construcción de un prototipo con sistema scada aplicado al control del micro clima y dosificación del producto almacenado en silos,» *Universidad Politécnica Salesiana, España*, 2009.
- [15] M.Kamaraguru, «Sequencing Bio-Reactor (SBR),» *SFC Environmental Technologies Pvt., India*, 2013.