

DESARROLLO DE SIMULADOR DE LODOS ACTIVADOS EN ESTADO
ESTACIONARIO

JESÚS GUILLERMO CADENA CEDANO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA

2015

DESARROLLO DE SIMULADOR DE LODOS ACTIVADOS EN ESTADO
ESTACIONARIO

ING. JESÚS GUILLERMO CADENA CEDANO

Monografía para optar al título de especialista en ingeniería ambiental

Director:

Richard Díaz Guerrero

Ing. Químico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA

2015

Ni la Universidad Industrial de Santander, ni los jurados se hacen responsables de los conceptos expuestos en el presente documento.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	.. 12
1. GENERALIDADES	.. 13
1.1 DESCRIPCIÓN DE AGUAS RESIDUALES.....	13
1.2 ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE IMPORTANCIA EN AGUAS RESIDUALES.....	14
1.2.4 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).....	15
1.2.4 Sólidos suspendidos (SS).....	15
1.2.3 Nitrógeno (N).....	16
1.2.4 Fósforo (P).....	16
1.3. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	17
1.3.1 Objetivos del tratamiento[2].....	17
1.3.2 Requisitos de tratamiento[2].....	19
1.3.3 Procesos de tratamiento de aguas residuales[2].....	20
1.4. PROCESO DE LODOS ACTIVADOS[2].....	22
1.4.1. Sistema convencional de lodos activados.....	23
1.4.2. Parámetros de diseño para procesos de lodos activados[2].....	24
1.4.3. Aireación[2].....	25
1.4.4. Requisitos nutricionales[2].....	26
1.4.5. Características de los lodos activados.....	27
1.4.6. Hinchamiento y levantamiento de lodos[2].....	28
1.4.7. Significado del tiempo promedio de retención celular[2].....	29
2. MODELADO	.. 31

2.1	MODELO MATEMÁTICO DE REACTOR CON MEZCLA COMPLETA SIN RECIRCULACIÓN[2]	31
2.2	MODELO MATEMÁTICO DE REACTOR CON MEZCLA COMPLETA CON RECIRCULACIÓN[2]	33
2.3	MODELO DE FLUJO PISTÓN CON RECIRCULACIÓN[2]	35
3.	SOLUCIÓN DE LOS DISTINTOS MODELOS ..	37
3.1.	SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE REACTOR CON MEZCLA COMPLETA SIN RECIRCULACIÓN.....	37
3.2.	SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE MEZCLA COMPLETA CON RECIRCULACIÓN	40
3.3.	SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO PISTÓN CON RECIRCULACIÓN	44
4.	DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA	47
5.	CONCLUSIONES	48
	<u>BIBLIOGRAFÍA.....</u>	49

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Diagrama de una planta de lodos activados.....	24
Figura 2. Esquema de mezcla completa sin recirculación.....	31
Figura 3. Esquema de mezcla completa con recirculación.....	33
Figura 4. Esquema de flujo en pistón con recirculación	36
Figura 5. Gráfica de tiempo de residencia celular contra sólidos suspendidos en el tanque para el modelo de mezcla completa sin recirculación	38
Figura 6. Gráfica tiempo de residencia celular contra DQO en el efluente para el modelo de mezcla completa sin recirculación	39
Figura 7. Tiempo de residencia celular contra sólidos suspendidos en el tanque para el modelo de mezcla completa con recirculación	41
Figura 8. Gráfica tiempo de residencia celular contra DQO en el efluente para el modelo de mezcla completa con recirculación	42
Figura 9. Gráfica tiempo de residencia celular contra biomasa en lodo recirculado para el modelo de mezcla completa con recirculación	42
Figura 10. Gráfica tiempo de residencia celular contra producción de lodos para el modelo de mezcla completa con recirculación	43
Figura 11. Gráfica tiempo de residencia celular contra DQO en el efluente para el modelo de flujo pistón con recirculación.....	45
Figura 12. Gráfica tiempo de residencia celular contra producción de lodos para el modelo de flujo pistón con recirculación.....	46
Figura 13. Vista previa de hoja de cálculo de modelo de mezcla completa sin recirculación	47

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla1. Características promedio de las aguas residuales en EPM	14
Tabla2. Procesos aplicables en el tratamiento de aguas residuales.	21
Tabla3. Relación de la carga orgánica del proceso de lodos activados con los grupos predominantes de organismos superiores[2].....	29
Tabla4. Parámetros cinéticos escogidos para resolver los modelos[4]	37
Tabla5. Parámetros de entrada para la solución del modelo matemático de reactor con mezcla completa sin recirculación	38
Tabla6. Parámetros de entrada para la solución del modelo matemático de reactor con mezcla completa con recirculación	41
Tabla7. Parámetros de entrada para la solución del modelo matemático de flujo pistón con recirculación	44

TÍTULO: DESARROLLO DE SIMULADOR DE LODOS ACTIVADOS EN ESTADO ESTACIONARIO*

Autor: CADENA CEDANO, Jesús**

Palabras claves: tratamiento de agua residual, tiempo promedio de retención celular, lodos activados, carga de DBO por unidad de volumen

En el presente proyecto se desarrolló un simulador de un proceso de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados.

En primer lugar se buscó información relativa a la descripción y características de importancia del agua residual, luego se consultó información sobre el funcionamiento del proceso de lodos activados relacionada con los parámetros de diseño más usados como son tiempo de aireación, la carga volumétrica o carga de DBO por unidad de volumen, la relación alimento microorganismo y el tiempo promedio de retención celular, características de lodos activados, requisitos nutricionales de los microorganismos involucrados en el proceso , condiciones de operación y función de la aireación.

Posteriormente se plantearon los modelos matemáticos del reactor de mezcla completa sin recirculación, mezcla completa con recirculación, de flujo pistón con recirculación. En el planteamiento de los modelos se supuso que la concentración de microorganismos en el afluente es despreciable y los balances de masa de microorganismos y de concentración de sustrato se plantearon en estado estable, se eligieron valores de coeficientes cinéticos dentro de rangos para el tratamiento de aguas residuales de la bibliografía.

La simulación de los modelos del proceso de tratamiento de lodos activados de aguas residuales para determinadas condiciones de operación es llevada a cabo en un simulador elaborado en microsoft excel 2010 para comparar resultados obtenidos por cada modelo.

* Trabajo de grado

** Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental. Director Ing. Richard Díaz

TITLE: DEVELOPMENT OF ACTIVATED SLUDGE SIMULATION IN STEADY STATE *

Author: CADENA CEDANO, Jesús**

Key words: wastewater process treatment, average time of cell retention, activated sludge, charge of DBO for unit volume.

In the present Project it was developed a simulator of a wastewater process treatment through activated sludge.

The first step in the development of the project was to find information relative to the description and important characteristics of wastewater, then was added the information about the operation of the process of activated sludge relative with design parameters most are used as time of the air flow, volumetric charge or charge of DBO for unit volume, relation food/microorganism and average time of cell retention, characteristics of activated sludge, nutritional requirements of microorganisms involved to the process, operating conditions and function of the air flow.

The equations of the mathematical models of continuous stirred tank reactor (CSTR) without recirculation, CSTR with recirculation and plug flow reactor with recirculation are established without time variations in the mass balance of microorganism and concentration of the substrate. It was assumed of concentration of microorganism in the affluent is negligible. The kinetics coefficients within the ranges of the wastewater treatment were selected from bibliography.

The simulation of the models of the wastewater process treatment with activated sludge for determined conditions of operation is carried out in a simulator designed in Microsoft excel 2010 to compare the results obtained by each model.

* Thesis

** Chemical Enginner School. Enviromental Enginner Especialist. Director: Ing. Richard Díaz

INTRODUCCIÓN

En el presente proyecto se diseña un simulador en EXCEL 2010 para llevar a cabo la simulación de condiciones de operación de diferentes sistemas de configuración de lodos activados con el fin de hacerlo una herramienta útil para el análisis y comparación de diversas condiciones físicas, dirigido a estudiantes que se introducen en el estudio del diseño de plantas residuales.

En el actual trabajo se simula un proceso de tratamiento de lodos activados de aguas residuales teniendo en cuenta el modelo de mezcla completa sin recirculación, el modelo de mezcla completa con recirculación y el modelo de flujo pistón con recirculación en estado estacionario con el fin de ofrecer la posibilidad de variar las condiciones de operación y supuestos clave en el diseño del proceso.

La metodología empleada para el proyecto comprende una consulta previa acerca de las características de las aguas residuales, el proceso de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados considerando sus parámetros de diseño en el capítulo 1, en el capítulo 2 se plantean las distintas ecuaciones de los modelos a solucionar y en el capítulo 3 se da solución a los distintos modelos matemáticas mostrando como resultado gráficas que muestran el comportamiento de variables clave en el funcionamiento del proceso.

En el capítulo 4 se hace una breve descripción de la interfaz gráfica diseñada para solucionar los modelos. La simulación del proceso de lodos activados permite estudiar el efecto de la modificación de variables y parámetros con resultados reproducibles, se puede introducir o retirar una suposición en el modelo matemático, lo cual no es posible en un proceso llevado a cabo en una planta real.

1. GENERALIDADES

1.1 DESCRIPCIÓN DE AGUAS RESIDUALES.

Se define el agua residual como aquella que ha sido utilizada en cualquier uso benéfico. El conocimiento de la naturaleza del agua residual es fundamental para el diseño, operación y control de los sistemas de aguas residuales (recolección y tratamiento).

Generalmente los generadores de aguas residuales se pueden agrupar en aguas residuales domésticas, industriales (caracterizadas o medidas y no medidas) y comerciales.[1]

Se consideran aguas residuales domésticas (ARD) los líquidos provenientes de las viviendas o residencias, edificios comerciales e institucionales. Se denominan aguas residuales municipales los residuos líquidos transportados por el alcantarillado de una ciudad o población y tratados en una planta de tratamiento municipal. Se llaman aguas residuales industriales las aguas residuales provenientes de las descargas industriales de manufactura.

También se acostumbra denominar aguas negras a las aguas residuales provenientes de inodoros, es decir, aquellas que transportan excrementos humanos y orina, ricas en sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales.

Aguas grises a las aguas residuales provenientes de tinajas, duchas, lavamanos y lavadoras, aportantes de DBO, sólidos suspendidos, fósforo, grasas y coliformes fecales, esto es, aguas residuales domésticas, excluyendo las de los inodoros.[2]

1.2 ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE IMPORTANCIA EN AGUAS RESIDUALES

Dadas las características y variaciones en la descarga de aguas residuales (AR), al sistema de alcantarillado, el tipo o sistema de alcantarillado usado, la diferencia en las costumbres de la comunidad aportante, el régimen de operación de las industrias servidas, el clima, etc., los caudales de aguas residuales oscilan ampliamente durante el año, cambian de un día a otro y fluctúan de una hora a otra. Todos los factores anteriores, entre otros, deben tenerse en cuenta en la predicción de las variaciones del caudal y, por consiguiente, de la concentración de las aguas residuales afluentes a una planta de tratamiento.

La tabla 1. Presenta las características promedio de las aguas residuales industriales no caracterizadas y las comerciales propias del sistema de alcantarillado de empresas públicas de Medellín (EPM).[1]

Tabla1. Características promedio de las aguas residuales en EPM

PARÁMETRO	COMERCIAL	INDUSTRIAL NO CARACTERIZADO
Flujo (L/s/día)	1,2	1,2
DBO ₅ (Demanda bioquímica de oxígeno) (mg/L)	166,7	220
SS (Sólidos suspendidos) (mg/L)	189,6	300
N (Nitrógeno) (mg/L)	17,8	17,9
P (fósforo) (mg/L)	1,75	1,88

1.2.4 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

El parámetro más ampliamente utilizado para determinar el contenido de materia orgánica en una muestra de agua. La DBO se mide determinando la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos (bacterias principalmente) para degradar, oxidar, estabilizar, etc. La materia orgánica. La prueba de DBO más conocida es la DBO₅. Esta prueba se realiza incubando la muestra de agua en el laboratorio y al cabo de cinco días se mide el consumo de oxígeno por parte de los microorganismos, y los resultados se reportan en mg/L de oxígeno consumido.

La prueba de DBO se utiliza para:

Determinar la cantidad de oxígeno requerida para biológicamente estabilizar la materia orgánica. Con este dato se diseñan los equipos de aireación de los procesos de lodos activados.

Dimensionar las unidades de tratamiento de aguas

Medir la eficiencia de algunos de los procesos de tratamiento de aguas residuales
Cobrar las tasas retributivas

1.2.4 Sólidos suspendidos (SS)

Se determinan restando los sólidos disueltos de los sólidos totales. Los sólidos suspendidos, son el tipo de sólidos más importantes de determinar en los estudios de calidad de agua en nuestro medio, principalmente porque se utilizan para el cobro de las tasas retributivas y el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales.

1.2.3 Nitrógeno (N)

El nitrógeno así como el fósforo son esenciales para el crecimiento de protistas y plantas, razón por la cual reciben el nombre de nutrientes o bioestimuladores. Debido a que el N es absolutamente básico para la síntesis de proteínas, será preciso conocer datos sobre la presencia del mismo en aguas, y en qué cantidades, para valorar la posibilidad de tratamiento de las aguas residuales domésticas e industriales mediante los procesos biológicos.

El nitrógeno total está compuesto de nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito y nitrato. La prueba más común de determinación de nitrógeno es el Kjeldahl (NTK). El NTK determina la concentración de nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal. Si se desea obtener solamente el orgánico, durante la prueba de laboratorio se elimina N amoniacal hirviendo la muestra.

1.2.4 Fósforo (P)

El fósforo es esencial para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos. Debido a que en las aguas superficiales ocurren nocivas proliferaciones incontroladas de algas, actualmente existe mucho interés en limitar la cantidad de fósforo que alcanzan las aguas superficiales por medio de vertimientos de aguas residuales domésticas, industriales y por escorrentía.

Las formas más frecuentes en que se presenta el fósforo en soluciones acuosas incluyen el ortofosfato, el polifosfato y los fosfatos orgánicos. Los ortofosfatos como PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , y H_3PO_4 , por ejemplo se hallan disponibles para el metabolismo biológico sin que sea precisa una ruptura posterior. El fósforo orgánico es de poca importancia en la mayor parte de los residuos domésticos,

pero puede ser un constituyente de importancia en los vertimientos industriales y lodos de aguas residuales domésticas.

Todas las formas de fósforo se determinan por conversión de la especie que se busca en ortofosfatos; el procedimiento en cada caso es específico para ortofosfatos.[3]

1.3. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

1.3.1 Objetivos del tratamiento[2]

El objetivo básico del tratamiento de aguas es proteger la salud y promover el bienestar de los individuos miembros de la sociedad.

El retorno de las aguas residuales a nuestros ríos o lagos nos convierte en usuarios directos o indirectos de las mismas, y a medida que crece la población, aumenta la necesidad de proveer sistemas de tratamiento o renovación que permitan eliminar los riesgos para la salud y minimizar los daños al ambiente.

En la concepción clásica del problema de la polución del agua, los ríos se consideran los receptores naturales de las aguas residuales, con su correspondiente carga de contaminantes y nutrientes. Las cargas, o concentración de contaminantes y nutrientes, constituyen el objeto de la regulación, por parte de leyes, decretos y normas, para establecer la calidad apropiada del agua, de acuerdo con los diferentes usos aplicables a ella. La legislación colombiana pertinente está diseminada en diferentes textos legales, pero principalmente en el decreto 1594 de 1984.

En la formulación, planeamiento y diseño de un sistema de tratamiento se pueden considerar objetivos diferentes, teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos económicos y técnicos, así como los criterios establecidos para descarga de efluentes o eficiencias mínimas, y eventualmente, motivaciones ecológicas.

En un desarrollo gradual de sistemas de tratamiento se pueden considerar, como objetivos iniciales principales del tratamiento de aguas residuales, los siguientes:

- Remoción de DBO
- Remoción de sólidos suspendidos
- Remoción de patógenos

Posteriormente ha sido común agregar:

Remoción de nitrógeno y fósforo

Finalmente se involucra:

- Remoción de sustancias orgánicas refractarias como los detergentes, fenoles y pesticidas.
- Remoción de trazas de metales pesados.
- Remoción de sustancias inorgánicas disueltas.

La complejidad del sistema de tratamiento es, por tanto, función de los objetivos propuestos. Teniendo en cuenta el gran número de operaciones y procesos disponibles para tratamiento de aguas, es común hablar de pretratamientos, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario o avanzado de aguas residuales.

En general, el pretratamiento tiene como objeto remover del agua residual aquellos constituyentes que pueden causar dificultades de operación y mantenimiento en los procesos posteriores o que, en algunos casos, no pueden tratarse conjuntamente con los demás componentes del agua residual.

El tratamiento primario se refiere comúnmente a la remoción parcial de sólidos suspendidos, materia orgánica u organismos patógenos, mediante sedimentación u otro medio, y constituye un método de preparar el agua para el tratamiento secundario. Por lo regular, el tratamiento primario remueve alrededor del 60% de los sólidos suspendidos del agua residual cruda y un 35 a 40% de la DBO.

El tratamiento secundario convencional se usa principalmente para remoción de DBO soluble sólidos suspendidos e incluye, por ello, los procesos biológicos de lodos activados, filtros percoladores, sistemas de lagunas y sedimentación.

El tratamiento terciario y avanzado supone, generalmente, la necesidad de remover nutrientes para prevenir la eutrofización de las fuentes receptoras o mejorar la calidad de un efluente secundario con el fin de adecuar el agua para su rehúso.

1.3.2 Requisitos de tratamiento[2]

Desde el punto de vista de protección de sistema de alcantarillado se prohíbe la descarga de materiales que puedan causar su taponamiento, su corrosión o producir riesgos de explosión. Para la protección del sistema biológico de tratamiento secundario es necesario controlar el flujo de contaminantes orgánicos e inorgánicos tóxicos.

Las limitantes principales, para protección de alcantarillas, se refieren a las características siguientes:

- Acidez o alcalinidad excesiva, las cuales pueden causar reacciones químicas.
- Gases tóxicos y reactivos como el ácido sulfhídrico, el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno.
- Sustancias explosivas.
- Grasas, aceites y sólidos suspendidos.
- Sustancias inflamables o tóxicas.

En lo referente a protección del sistema de tratamiento, las restricciones se refieren principalmente a:

- DBO Y SS excesivamente altos
- pH indeseable, menor de cinco o mayor de nueve
- Temperatura excesiva
- Grasas y aceites en concentración excesiva
- Sustancias tóxicas inhibitorias del proceso biológico

1.3.3 Procesos de tratamiento de aguas residuales[2]

La selección de un proceso de tratamiento de aguas residuales, o de la combinación adecuada de ellos, depende principalmente de:

- Las características del agua cruda
- La calidad requerida del efluente
- La disponibilidad del terreno
- Los costos de construcción y operación del sistema de tratamiento

- La confiabilidad del sistema de tratamiento
- La facilidad de optimización del proceso para satisfacer requerimientos futuros más exigentes

La mejor alternativa de tratamiento se selecciona con base en el estudio individual de cada caso, de acuerdo con las eficiencias de remoción requeridas y con los costos de cada una de las posibles soluciones técnicas

Tabla2. Procesos aplicables en el tratamiento de aguas residuales.

CONTAMINANTE	PROCESO
DBO	Lodos activados, lagunas aireadas, filtros percoladores, unidades de contacto biológico rotatorio o biodiscos, lagunas facultativas aireadas o fotosintéticas, lagunas anaeróbicas, filtros anaeróbicos, proceso anaeróbico de contacto, reactores anaeróbicos o de flujo ascensional.
Sólidos suspendidos	Sedimentación, flotación, cribado, filtración.
Compuestos orgánicos refractarios	Adsorción con carbón, intercambio iónico, electrodiálisis, ósmosis inversa.
Nitrógeno	Nitrificación – desnitrificación, intercambio iónico
Fósforo	Precipitación química, coprecipitación biológica, intercambio iónico
Metales pesados	Intercambio iónico, precipitación química.
Sólidos disueltos inorgánicos	Intercambio iónico, electrodiálisis, ósmosis inversa

1.4. PROCESO DE LODOS ACTIVADOS[2]

Todos los procesos de lodos activados tienen en común el contacto de aguas residuales con floc biológico previamente formado en un tanque de aireación. El lodo activado consiste en una masa floculenta de microorganismos, materia orgánica muerta y materiales inorgánicos; tiene la propiedad de poseer una superficie altamente activa para la adsorción de materiales coloidales y suspendidos, a la cual debe su nombre de activado. El resultado final es una porción de materia orgánica, susceptible de descomposición biológica, convertida en compuestos inorgánicos y el resto, transformada en lodo activado adicional.

El medio ambiental de un sistema de lodos activados puede considerarse un medio acuático, es colonizado por microorganismos muy variados, como bacterias, hongos, protozoos y metazoos pequeños; la agitación constante y la recirculación de lodos hacen, sin embargo, el medio inhóspito para la macrofauna acuática.

Las bacterias constituyen el grupo más importante de microorganismos, en el proceso de lodos activados, por su función de estabilización del material orgánico y en la formación del floc de lodo activo. Se ha encontrado una gran variedad de especies de bacterias en lodos activados, siendo muy comunes las de los géneros alcalígenos flavobacterium, bacillus y pseudomonas. En el proceso de purificación son importantes las bacterias nitrificantes; tales como nitrosomonas y nitrobacter, al igual que la zooglea ramigera, considerada por algunos autores como organismo principal en la formación del lodo activo por su gran habilidad para formar floc biológico.

Los protozoos son, con las bacterias, los organismos más abundantes en lodos activados. Algunos son completa o parcialmente sapróbicos y compiten con las bacterias por el material orgánico; otros son los holozoicos y usan material

orgánico sólido como alimento, al igual que bacterias y otros protozoos, proveyendo un enlace vital en la cadena alimenticia y en el proceso de tratamiento.

La comunidad de lodos activados puede ser muy variable y depende de:

- Naturaleza del suministro alimenticio
- Concentración del alimento
- Turbulencia
- Temperatura
- Tiempo de aireación
- Concentración de lodos

Las aguas residuales crudas fluyen en el tanque de aireación con su contenido de materia orgánica (DBO) como suministro alimenticio. Las bacterias metabolizan los residuos produciendo nuevas bacterias, utilizando oxígeno disuelto y liberando dióxido de carbono. Los protozoos consumen bacterias para obtener energía y reproducirse. Una porción del crecimiento bacterial muere, liberando su contenido celular en la solución para una nueva síntesis en células microbiales.

1.4.1. Sistema convencional de lodos activados

El esquema específico de flujo del proceso biológico convencional de lodos activados (tanque de aireación, sedimentador y recirculación de lodos activados) se indica en la figura 1.

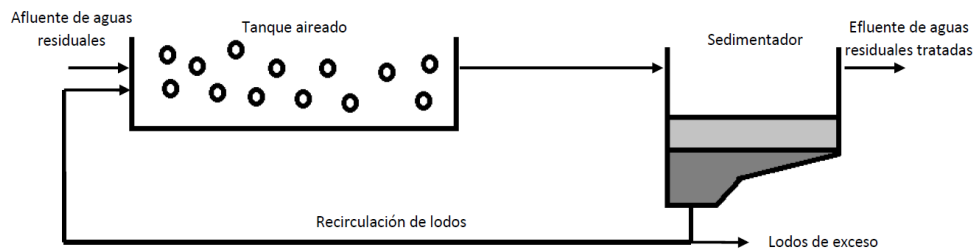


Figura 1. Diagrama de una planta de lodos activados.

Los lodos recirculados y el agua residual proveniente del sedimentador primario, si lo hay, entran en el tanque de aireación, donde son aireados y mezclados a medida que la mezcla líquida (lodos + agua residual) fluye a lo largo del tanque, los microorganismos estabilizan aerobiamente la materia orgánica en el tanque de aireación y fluyen al sedimentador secundario donde el floc biológico es separado del agua residual, dejando un efluente claro de bajo contenido orgánico. Una porción de los lodos es recirculada al tanque de aireación como simiente y, el exceso, enviado al sistema de tratamiento y disposición de lodos.

1.4.2. Parámetros de diseño para procesos de lodos activados[2]

El tiempo de aireación, la carga volumétrica o carga de DBO por unidad de volumen, la relación alimento/microorganismos (A/M) y el tiempo promedio de retención celular son los parámetros más usados en el diseño de lodos activados.

Datos necesarios para el diseño de proceso de lodos activados

En general, se recomienda determinar los datos siguientes:

Caudales: promedio diario, máximo diario, máximo horario; actuales y de diseño.

Caracterización:

DBO promedio diario

DBO máxima en cuatro horas

Sólidos suspendidos totales y volátiles, promedio diario

DQO promedio diario

NTK(nitrógeno total) promedio diario

pH, valores instantáneos

alcalinidad y acidez si $\text{pH} > 5,5$ O $< 9,0$

grasas y aceites

metales pesados

1.4.3. Aireación[2]

La aireación, en los reactores de lodos activados, tiene como propósito:

- Suministrar oxígeno a las células
- Mantener las células en suspensión
- Mantener en contacto íntimo el residuo con los lodos activos

El tanque de aireación es el corazón del proceso de lodos activados y debe ser del tamaño adecuado para proporcionar suficiente tiempo de retención, usualmente 0,5 a 24 horas, dependiendo del tipo de proceso.

El proceso de lodos activados es un proceso aerobio, y por ello es necesario mantener condiciones aerobias en todo el tanque de aireación, sosteniendo un nivel de OD mínimo de 0,5 mg/L en todo punto del tanque. Esto se logra manteniendo una concentración de 2 mg/L de OD en el efluente del tanque de aireación. Los bacteriólogos han demostrado que la tasa de respiración de las células es independiente de la concentración de OD en el agua, para concentraciones de OD entre 0,3 y 8 mg/L.

Existen dos tipos principales de sistemas de aireación comúnmente usados en los procesos de lodos activados:

- Aireación por difusión superficial
- Aireación mecánica

En el primer tipo se entiende el proceso en el cual la aireación es producida en el licor mediante aire que pasa a través de un difusor; como aireación mecánica se define la introducción de aire en el licor por medio de turbulencia creada por acción de un equipo mecánico.

Para diseño, en general, las normas recomiendan que el equipo de aireación sea capaz de mantener un mínimo de 2 mg/L de OD en el licor mezclado, en todo momento, y proporcione una mezcla vigorosa del contenido de agua en el tanque de aireación.

La aireación, por difusión o mecánica, en cualquier proceso de tratamiento de aguas residuales, tiene costos altos de inversión y operación debido a la baja eficiencia de transferencia de oxígeno de los equipos y la dependencia de ésta, de las condiciones de funcionamiento.

1.4.4. Requisitos nutricionales[2]

En todo proceso de tratamiento biológico se requiere que los microorganismos reciban los elementos necesarios para formar el protoplasma. Las aguas residuales domésticas normalmente contienen los elementos requeridos, aun cuando ciertos residuos industriales son deficientes en algunos alimentos nutricionales importantes, especialmente nitrógeno y fósforo.

La naturaleza de los compuestos orgánicos, en el agua residual que se va a tratar, determina la especie biológica predominante en el floc biológico de lodo activado. Así por ejemplo, un residuo deficiente en nitrógeno estimula el crecimiento de hongos en vez de bacterias. Si predominan los hongos filamentosos habría una sedimentación pobre y una baja eficiencia en remoción de DBO.

Teóricamente, una relación de DBO/N/P de 100/5/1 es adecuada para tratamiento aeróbico, con pequeñas variaciones según el tipo de proceso de tratamiento y modo de operación. Para tratamiento en procesos de mezcla completa de lodos activados se ha sugerido una relación DBO/N/P de 100/3/0,7. En general, las aguas residuales domésticas exhiben un exceso de N y P, con relación de 100/17/5, lo cual permite tratamiento biológico apropiado.

Cuando un agua residual municipal contiene un gran volumen de residuos industriales deficientes en N, se suministra nitrógeno adicional mediante la adición de amoníaco deshidratado (NH_3), y si se requiere fósforo se agrega ácido fosfórico (H_3PO_4).

1.4.5. Características de los lodos activados

A medida que el floc crece y envejece, cambia su composición bacteriana, surgen los protozoos que se alimentan de bacterias y una alta proporción del floc pasa a estar constituida por células muertas y sólidos inertes acumulados, al tiempo que disminuyen la actividad biológica y la capacidad de oxidación. En otras palabras, puede decirse que el floc pasa por diferentes fases de crecimiento, madura y luego declina.

El grado de tratamiento logrado en un proceso de aireación depende directamente de la sedimentabilidad del lodo activado en el sedimentador final. Un floc biológico que se aglomera y sedimenta bien, por acción de la gravedad, deja un sobrenadante claro como efluente; por el contrario, un floc pobre, liviano o flotante de crecimiento filamentoso, no se sedimentará por gravedad y contribuirá con DBO y SS en el efluente.

La sedimentabilidad de los lodos activados, en condiciones normales de operación del proceso, depende de la relación A/M (alimento/microorganismo). Por el contrario, la reducción de DBO es menor en los procesos de tasa alta, con mayor carga de DBO, menor tiempo de aireación y mayor relación A/M, con lo cual el lodo tiene menor sedimentabilidad.

Para mantener una edad de lodos adecuada y sedimentabilidad conveniente, se debe recircular la cantidad apropiada de lodos; por el diseño debe considerar la flexibilidad y capacidad necesarias para la remoción, recirculación y almacenamiento rápido y eficiente de los lodos, especialmente en condiciones de operación de cargas pico extremas y no sólo sobre el supuesto de cargas o caudal promedio diario anual.

1.4.6. Hinchamiento y levantamiento de lodos[2]

En muchas ocasiones las plantas de tratamiento desarrollan biomasa de sedimentabilidad pobre, mientras que el floc biológico expande su volumen, disminuye su densidad y se reduce la velocidad de asentamiento. Estos lodos de sedimentabilidad pobre, lodos que se asientan y compactan muy lentamente, son la causa del problema conocido generalmente como hinchamiento de lodos. La causa del problema del hinchamiento es la presencia en el floc biológico de cantidades excesivas de bacterias filamentosas y hongos. Los controles operativos que se ofrecen para controlar este problema son:

- Mantener un índice volumétrico de lodos (IVL) menor de 150 mL/g, aunque cada planta tiene un valor específico óptimo de IVL, el cual debe determinarse de acuerdo con la experiencia operativa previa.
- Mantener una relación alimento/microorganismos apropiada
- Mantener una edad óptima de lodos.
- Identificar los grupos principales de microorganismos de lodos activados y establecer su abundancia relativa para evaluar la calidad del lodo. Las relaciones entre estos organismos y la carga orgánica de operación del proceso de lodos puede interpretarse como se indica en la tabla 3.

Tabla3.Relación de la carga orgánica del proceso de lodos activados con los grupos predominantes de organismos superiores[2]

CONDICIONES	GRUPOS PREDOMINANTES
Carga orgánica baja	Ciliados adheridos, rotíferos e invertebrados superiores, especialmente nematodos
Carga orgánica óptima	Buena diversidad de organismos; dominan los ciliados libres y adheridos
Carga orgánica alta	Flagelados, amibas y ciliados pequeños libres.

1.4.7. Significado del tiempo promedio de retención celular[2]

Es el peso de sólidos en suspensión en el sistema dividido por el peso total de sólidos que abandonan el sistema en la unidad de tiempo.

Para una planta específica de tratamiento la única manera de calificar el valor del tiempo de retención celular es mediante el control de la calidad del efluente, de la estabilidad del proceso y de la sedimentabilidad del lodo. El mejor tiempo de retención celular será aquel que produzca el mejor efluente.

2 MODELADO

2.1 MODELO MATEMÁTICO DE REACTOR CON MEZCLA COMPLETA SIN RECIRCULACIÓN[2]

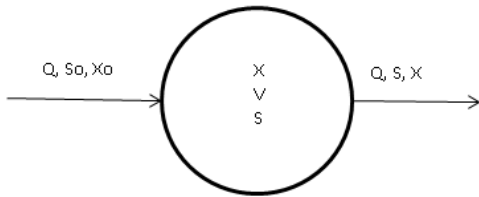


Figura 2. Esquema de mezcla completa sin recirculación

Afluente – efluente + generación = acumulación

$$QX_0 - QX + Vr'_g = V \frac{dX}{dT}$$

V: volumen del reactor

$\frac{dX}{dT}$: Tasa de crecimiento de microorganismos

Q: caudal

X₀: biomasa en el afluente mg SSV/L

X: biomasa en el reactor mg SSV/L

r'_g: tasa neta de crecimiento de microorganismos mg SSV/L*d

μ_m: tasa máxima específica de crecimiento d⁻¹

S: concentración de sustrato limitante de crecimiento, mg/L.

K_s : constante de saturación, numéricamente igual la concentración de sustrato, mg/L

K_d : coeficiente de respiración endógena o tasa específica de declinación endógena, d^{-1}

$$r'_g = \frac{\mu_m S}{K_s + S} - K_d X$$

Suponiendo que la concentración de microorganismos en el afluente es despreciable $X_0 \approx 0$ y para estado permanente $\frac{dX}{dt} = 0$

$$\frac{Q}{V} = \frac{1}{\theta} = \frac{\mu_m S}{K_s + S} - K_d$$

Donde θ es el tiempo de retención hidráulico.

Balance de masa para el sustrato

Afluente – efluente + generación = acumulación

$$QS_o - QS + Vr_s = V \frac{dS}{dt}$$

$$r_s = \frac{KXS}{K_s + S}$$

V: volumen del reactor

$\frac{dS}{dt}$: tasa de acumulación de sustrato

S_o : concentración de sustrato en afluente

S: concentración de sustrato en efluente

K: tasa máxima de utilización de sustrato por unidad de masa de microorganismos

X: biomasa en el reactor mg/L

K_s : constante de saturación del sustrato

r_s : tasa de utilización de sustrato, mg/L.d

Para estado permanente $\frac{dS}{dt} = 0$

$$0 = S_o - S - \theta \frac{KXS}{K_s + S}$$

2.2 MODELO MATEMÁTICO DE REACTOR CON MEZCLA COMPLETA CON RECIRCULACIÓN[2]

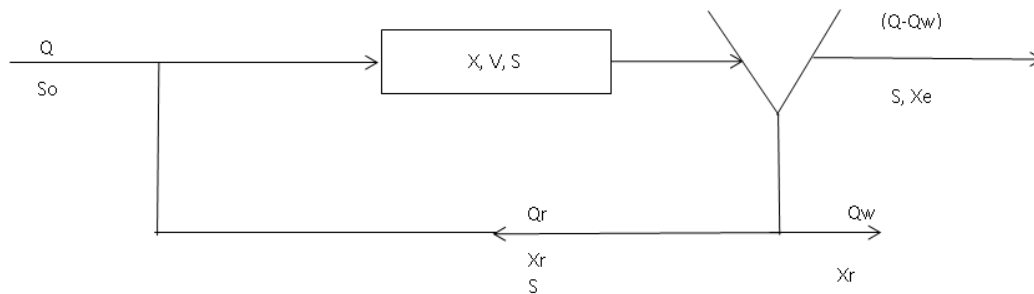


Figura 3. Esquema de mezcla completa con recirculación

En este sistema se supone que el contenido del reactor está mezclado completamente, que todas las reacciones ocurren en el tanque de aireación y que la concentración de biomasa en el afluente es despreciable.

Acumulación

o cambio en biomasa = biomasa afluente - biomasa efluente + crecimiento neto

$$V \frac{dX}{dt} = QX_o - [Q_w X_R + (Q - Q_w) X_c] + Vr'_g$$

Despreciando X_o :

$$V \frac{dX}{dt} = -[Q_w X_R + (Q - Q_w) X_e] + Vr'_g$$

V: volumen del reactor

$\frac{dX}{dt}$: tasa de crecimiento de microorganismos

Q : caudal de afluente

X_o : biomasa en afluente

Q_w : caudal de lodo dispuesto

X_R :biomasa en lodo recirculado

r'_g : tasa de crecimiento bacterial

X_e : biomasa en efluente

X: biomasa en reactor

Y: coeficiente de producción de crecimiento en la fase logarítmica, masa microbial producida / masa de sustrato removido

θ_c : edad de lodos de operación, d

r_s : tasa de utilización de sustrato

$$0 = -[Q_w X_R + (Q - Q_w) X_e] + Vr'_g$$

$$\frac{Q_w X_R + (Q - Q_w) X_e}{VX} = -Y \frac{r_s}{X} - Kd$$

$$\theta_c = \frac{VX}{Q_w X_R + (Q - Q_w) X_e}$$

Para sustrato:

Acumulación

o cambio en sustrato = alimento afluente - alimento efluente + asimilación

$$V \frac{dS}{dt} = Q S_o + Q_R S - (Q + Q_R) S + r_s V$$

Para estado permanente no hay cambio en concentración de alimento:

$$\frac{dS}{dt} = 0$$

$$0 = Q S_o - Q S - \frac{\mu_m S X}{Y(K_s + S)} V$$

$$X V \frac{\mu_m S}{(K_s + S)} = Y Q (S_o - S)$$

$$X V \left[\frac{1}{\theta_c} + K_d \right] = Y Q (S_o - S)$$

$$X = \frac{\theta_c Y (S_o - S)}{\theta (1 + K_d \theta_c)}$$

2.3 MODELO DE FLUJO PISTÓN CON RECIRCULACIÓN[2]

En el proceso de lodos activados de flujo pistón, el agua residual negra pasa a través del tanque y sale en el mismo orden que entra como líquido mezcla. Si se suponen condiciones de flujo pistón, la demanda de oxígeno disminuye a lo largo del tanque de aireación, mientras que el suministro de oxígeno permanece constante. Las partículas conservan su identidad y permanecen en el tanque un tiempo igual al tiempo de retención hidráulica. Este tipo de flujo es aproximadamente el que se produce en tanques alargados con una alta relación longitud-anchura.

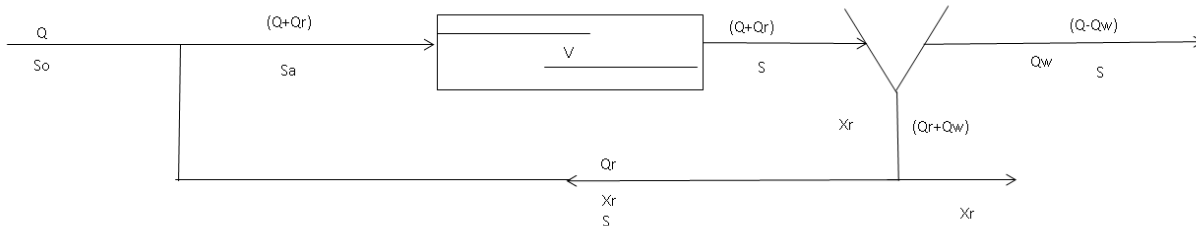


Figura 4. Esquema de flujo en pistón con recirculación

En este sistema se supone que existe mezcla completa en la sección transversal de flujo, sin ninguna mezcla en la dirección longitudinal.

$$X = \frac{\theta_c Y (s_o - S)}{\theta (1 + k_d \theta_c)}$$

$$P_x = \frac{YQ(S_o - S)}{1 + k_d \theta_c}$$

$$R = \frac{Q_R}{Q}$$

Donde R es la relación de recirculación

Para $R < 1$:

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{Yk(S_o - S)}{K_s \ln\left(\frac{S_o}{S}\right) + (S_o - S)} - k_d$$

3 SOLUCIÓN DE LOS DISTINTOS MODELOS

3.1. SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE REACTOR CON MEZCLA COMPLETA SIN RECIRCULACIÓN

La solución del modelo matemático del reactor con mezcla completa sin recirculación implica resolver un conjunto de ecuaciones algebraicas donde se escogió el tiempo de residencia celular y el DQO de afluente y el volumen de reactor como variables independientes. Se obtienen como respuesta gráficas de sólidos suspendidos de licor mezclado en el tanque y DQO en efluente contra tiempo de residencia celular. Los valores de los parámetros cinéticos típicos a 20 °C para el proceso de lodos activados se muestran en la tabla 4. Los valores de entrada se muestran en la tabla 5.

Tabla4. Parámetros cinéticos escogidos para resolver los modelos[4]

coeficiente de crecimiento bacteriano Kg SVS/Kg DBO (0,4 - 0,8)	Y	0,5
coeficiente de eliminación de bacterias d ⁻¹ (0,04 - 0,075)	Kd	0,05
constante promedio de velocidad (KgDBO/m ³) (25 - 100)	Ks	50
tasa máxima de utilización de sustrato por unidad de masa de microorganismos (d ⁻¹) (2 - 10)	k	5

Tabla5. Parámetros de entrada para la solución del modelo matemático de reactor con mezcla completa sin recirculación

DQO inicial en afluente (Kg/m ³)	So	500
volumen del reactor (m ³)	V	4100

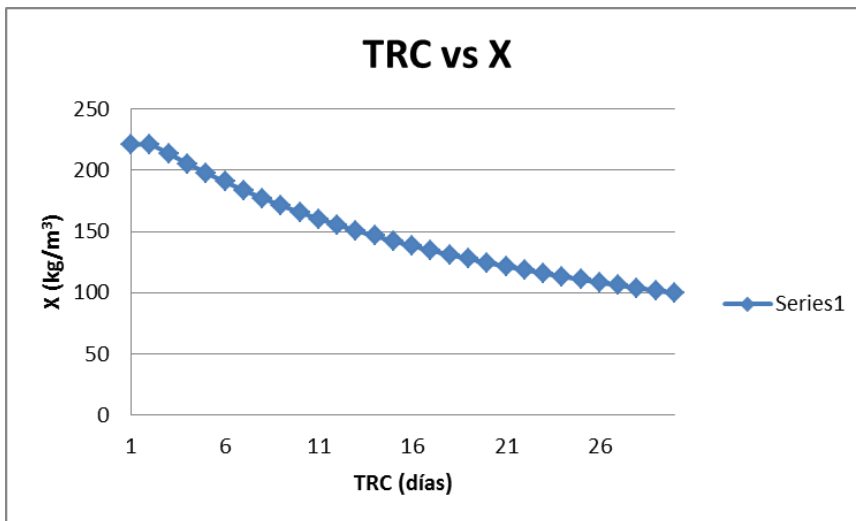


Figura 5. Gráfica de tiempo de residencia celular contra sólidos suspendidos en el tanque para el modelo de mezcla completa sin recirculación

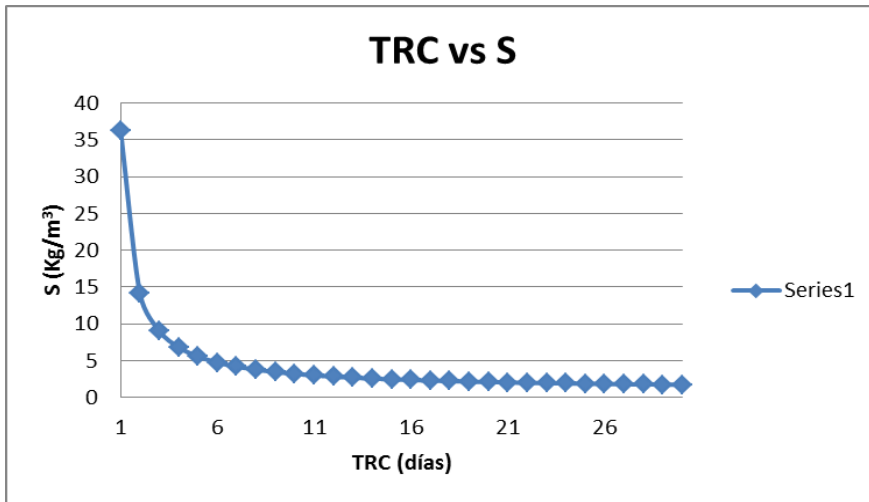


Figura 6. Gráfica tiempo de residencia celular contra DQO en el efluente para el modelo de mezcla completa sin recirculación

El tiempo crítico de retención celular por debajo del cual los microorganismos son extraídos del sistema, se calcula con la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\theta_{cc}} = \frac{YkS_o}{K_s + S_o} - k_d$$

$$\theta_{cc} = \left(\frac{0,5 \times 5 \times 500}{50 + 500} - 0,05 \right)^{-1}$$

$$\theta_{cc} = 0,4499d$$

Para cualquier tiempo de retención celular mayor que el tiempo crítico, la concentración de sustrato en el efluente es independiente de la concentración de sustrato en el afluente. En el reactor de mezcla completa, sin recirculación, como el tiempo de retención es igual a la edad de lodos, se deduce que el tiempo de retención debe ser tan largo como para no extraer la biomasa más rápido de lo que ella se reproduce. El tiempo de retención debe ser tal que la biomasa extraída en el efluente del reactor sea reemplazada exactamente por una masa igual formada en el reactor en el mismo intervalo de tiempo.[2]

El diseño del reactor se hará con una edad de lodos mayor que el tiempo crítico de retención celular, para asegurar un tratamiento apropiado, el cociente entre ambos debe estar entre 2 y 20 y es denominado factor de seguridad:

$$FS = \frac{\theta}{\theta_{cc}}$$

Una edad de lodos prolongada permite tener un factor de seguridad alto y un proceso más estable y confiable.

3.2. SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE MEZCLA COMPLETA CON RECIRCULACIÓN

La solución del modelo matemático del reactor con mezcla completa con recirculación implica resolver un conjunto de ecuaciones algebraicas donde se escogió el tiempo de residencia celular, el DQO de afluente, el volumen de reactor, el caudal de lodo dispuesto, el caudal de lodo recirculado, el caudal de entrada de aguas residuales y la biomasa en efluente como variables independientes. Se obtienen como respuesta gráficas de sólidos suspendidos de licor mezclado en el tanque, DQO en efluente y biomasa en lodo recirculado contra tiempo de residencia celular. Los valores de los parámetros cinéticos típicos a 20 °C para el proceso de lodos activados se muestran en la tabla 4. Los valores de entrada se muestran en la tabla 7.

Tabla6. Parámetros de entrada para la solución del modelo matemático de reactor con mezcla completa con recirculación

DQO inicial en afluente (Kg/m ³)	So	500
volumen del reactor (m ³)	V	4100
caudal de lodo dispuesto (m ³ /d)	Qw	400
caudal de lodo recirculado (m ³ /d)	Qr	100
caudal de aguas residuales (m ³ /d)	Q	10000
biomasa en efluente Kg SSV/L	Xe	10

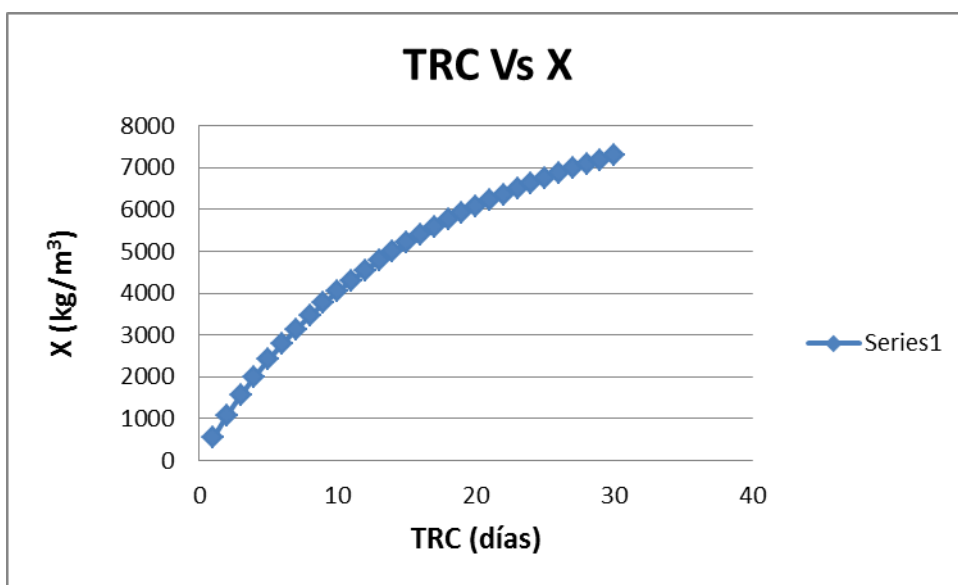


Figura 7. Tiempo de residencia celular contra sólidos suspendidos en el tanque para el modelo de mezcla completa con recirculación

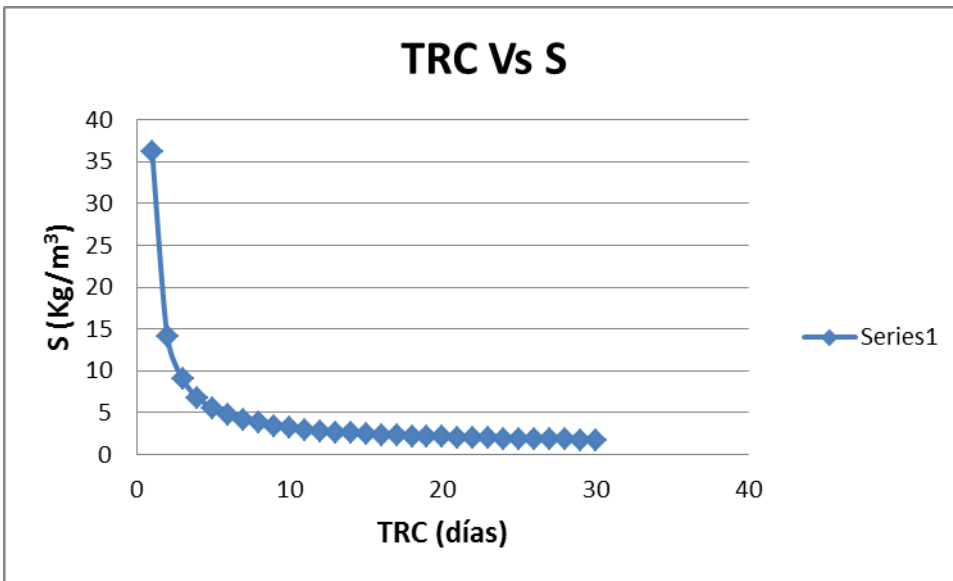


Figura 8. Gráfica tiempo de residencia celular contra DQO en el efluente para el modelo de mezcla completa con recirculación

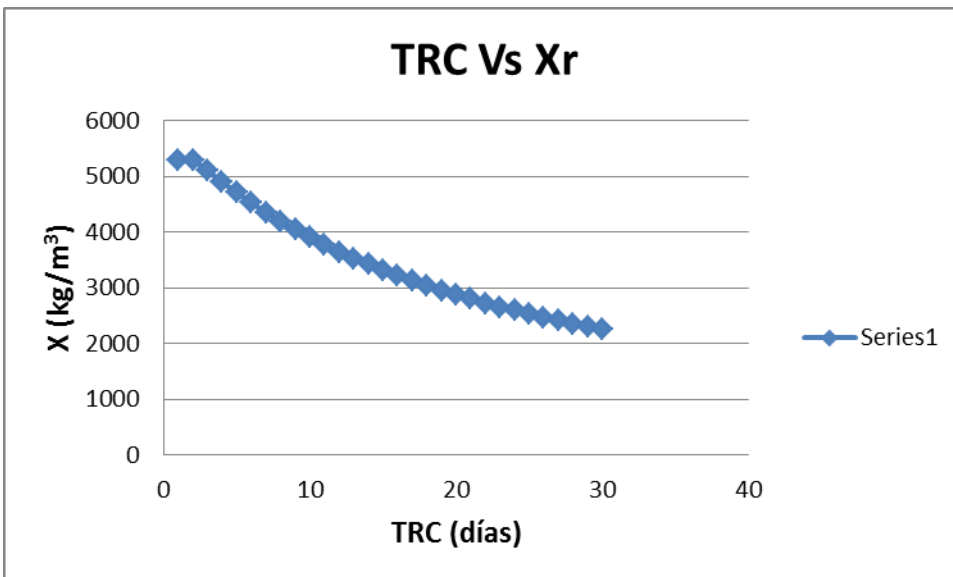


Figura 9. Gráfica tiempo de residencia celular contra biomasa en lodo recirculado para el modelo de mezcla completa con recirculación

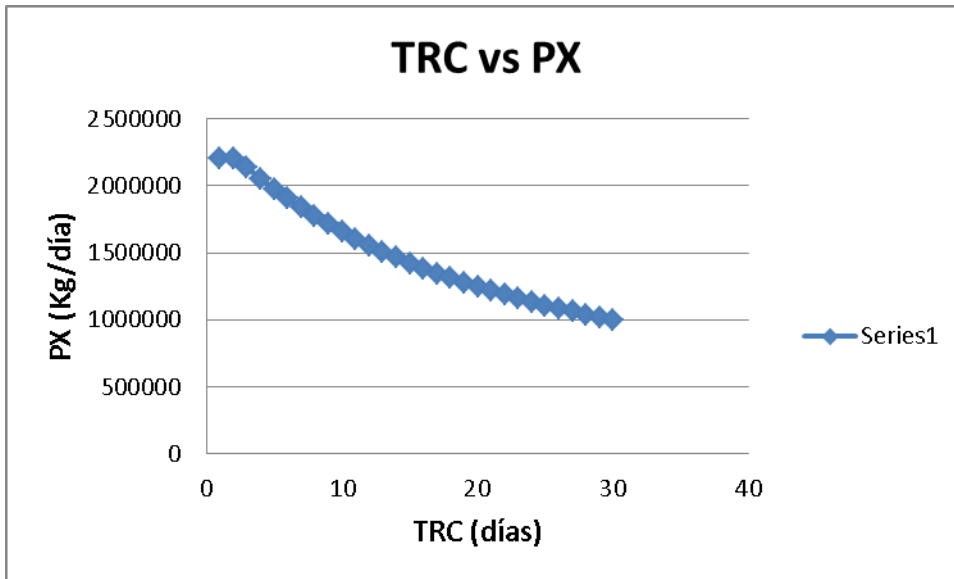


Figura 10. Gráfica tiempo de residencia celular contra producción de lodos para el modelo de mezcla completa con recirculación

El hecho de que la concentración de sustrato en el efluente dependa solamente del tiempo de retención celular y de las variables cinéticas, mas no de la concentración del afluente debe reflejarse en otras variables del sistema.

En la Figura 10 se observa que a medida que se aumenta el tiempo de residencia celular disminuye la producción de lodos Px determinando un descenso en el costo de operación. Sin embargo a medida que aumenta el tiempo de residencia celular también se incrementa la concentración de sólidos en el tanque de aireación X y esto podría llevar a una sobrecarga y eventual falla del sedimentador. Para evitar este problema Orhon y Artan (1994) recomiendan que en sistemas de aireación extendida la concentración de sólidos suspendidos volátiles (SSV) en el último tanque (anterior al sedimentador) no supere 5000 - 7000 mgSSV/L (7000 - 10000 mgDQO/L).

3.3. SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO PISTÓN CON RECIRCULACIÓN

La solución del modelo matemático del reactor de flujo pistón con recirculación implica resolver un conjunto de ecuaciones algebraicas donde se escogió el DQO final en efluente (S) como variable independiente. Y como parámetros de entrada el volumen de reactor, el caudal de lodo dispuesto, el caudal de lodo recirculado, el caudal de entrada de aguas residuales y la biomasa en efluente. Se obtiene como respuesta el tiempo de residencia celular, esto con el fin de comparar el rendimiento de consumo de DBO para el reactor de mezcla completa con recirculación y el reactor de flujo pistón con recirculación. Se utilizan los mismos valores de parámetros de entrada y valores de parámetros cinéticos del modelo anterior presentados en las tablas 6 y 7.

Tabla7. Parámetros de entrada para la solución del modelo matemático de flujo pistón con recirculación

DQO inicial en afluente (Kg/m ³)	So	500
volumen del reactor (m ³)	V	4100
caudal de lodo dispuesto (m ³ /d)	Qw	400
caudal de lodo recirculado (m ³ /d)	Qr	100
caudal de aguas residuales (m ³ /d)	Q	10000
biomasa en efluente Kg SSV/L	Xe	10

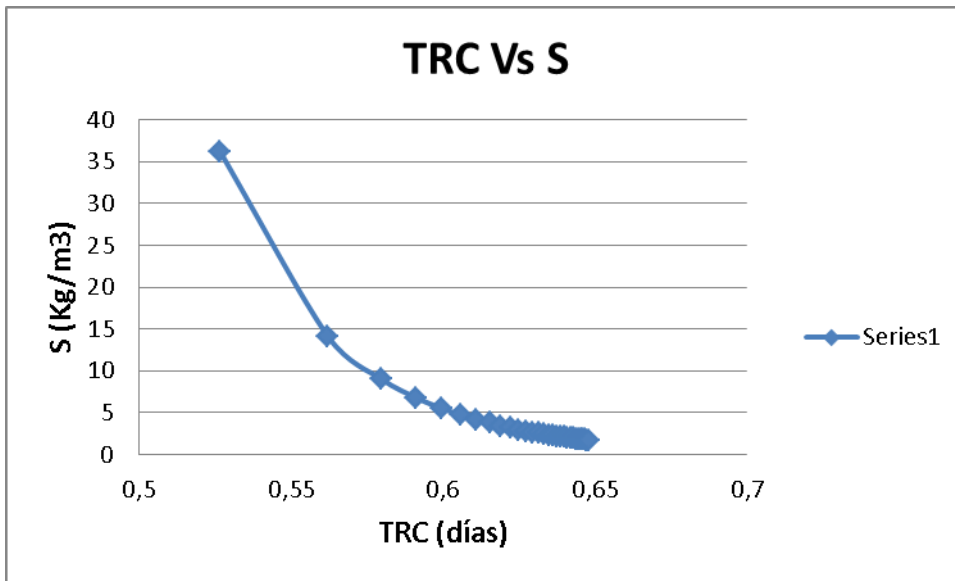


Figura 11. Gráfica tiempo de residencia celular contra DQO en el efluente para el modelo de flujo pistón con recirculación

Al observar la figura 11 se llega a la conclusión de que el reactor de flujo pistón es más eficaz que el de flujo continuo en tanque agitado, ya que para cada valor fijado de tiempo de residencia existirá un porcentaje de DBO remanente inferior en el efluente del reactor.

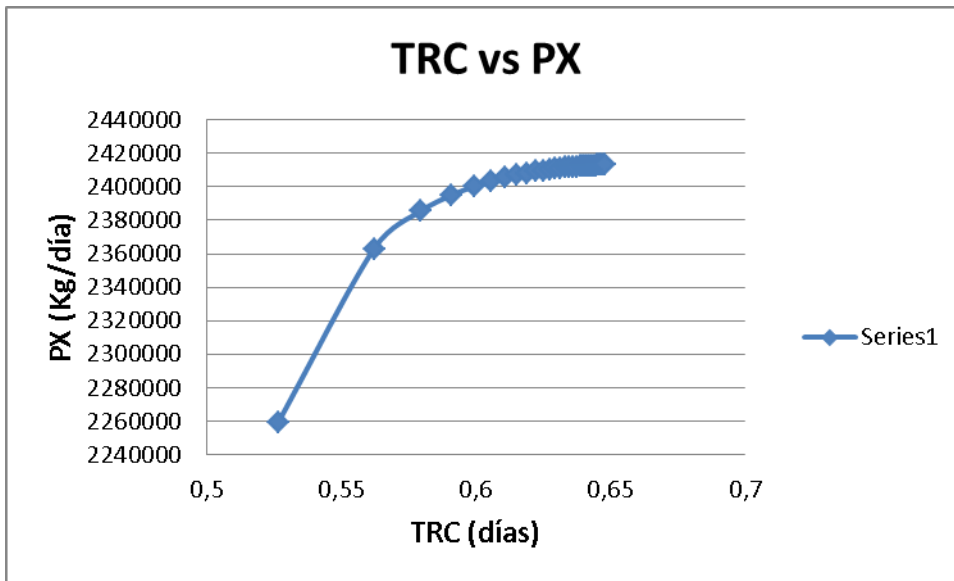


Figura 12. Gráfica tiempo de residencia celular contra producción de lodos para el modelo de flujo pistón con recirculación

En la figura 12 se observa que para el intervalo de tiempo de residencia escogido la producción de lodos aumenta. Esto ocurre porque en la siguiente ecuación el DQO en efluente (S) decae en un intervalo de tiempo muy pequeño.

$$P_x = \frac{YQ(S_o - S)}{1 + k_d \theta_c}$$

4. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

Para cada modelo a resolver se creó una hoja de cálculo en Excel, los datos en amarillo corresponden a los valores que debe ingresar el usuario.

A continuación se muestra un pantallazo del modelo matemático de reactor con mezcla completa sin recirculación.

El libro se encuentra en CD anexo y se llama PROYECTO.xlsm

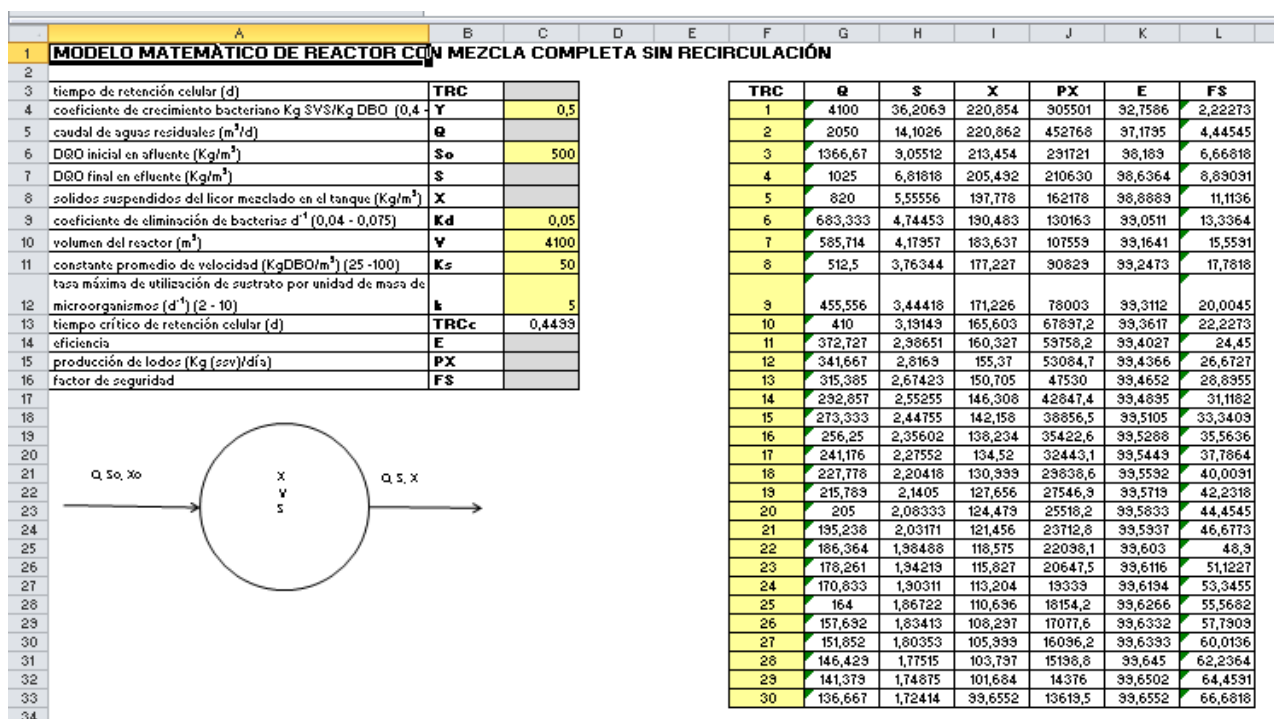


Figura 13. Vista previa de hoja de cálculo de modelo de mezcla completa sin recirculación

5. CONCLUSIONES

Se implementaron los modelos en el simulador en orden de creciente complejidad de tal forma que al realizar la simulación de los modelos se pueden ver los efectos que tienen las consideraciones asumidas para cada condición física.

Desde el punto de vista práctico un reactor de flujo estable sin recirculación no es muy conveniente en el proceso de lodos activados, sin embargo, de este modelo teórico se pueden reproducir pruebas a escala piloto para determinar los coeficientes cinéticos, los cuales son los mismos para un agua residual cuando en la realidad se opera en condiciones similares a como se efectuaron las pruebas.

A pesar de la ventaja de rendimiento del reactor de flujo pistón, en la mayoría de diseño de plantas se escoge el reactor de tanque agitado con mezcla completa debido a que el sistema de mezcla completa es capaz de soportar los cambios bruscos de DBO en el efluente de una manera más satisfactoria que el reactor de flujo pistón y en la práctica es más difícil alcanzar el flujo pistón debido a la turbulencia generada por la aireación requerida.

BIBLIOGRAFÍA

[1] CONTRERAS, E M. MENES, R J. Tratamiento biológico de aguas residuales.

[2] ROMERO, JAIRO A. Calidad del agua. Ed. Escuela colombiana de ingeniería. Colombia 2009.

[3] ROMERO, JAIRO A. Tratamiento de aguas residuales. Ed. Escuela colombiana de ingeniería. Colombia 2010.

[4] SIERRA CARLOS A. Calidad del agua. Ed la U. Colombia 2011.