



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**“Métodos para la estimación de parámetros cinéticos en reactores de
lodos activados de mezcla completa”**

TRABAJO MONOGRAFICO

**Para obtener el grado de:
Ingeniera Ambiental**

PRESENTA
Dalia Carolina Vera Gorocica

SUPERVISORES

Dr. José Manuel Carrión Jiménez
Q.F.B José Luís González Bucio
Dr. José Alfonzo Canche Uuh

Chetumal, Quintana Roo, Noviembre 2011



Monografía elaborada bajo la supervisión del comité de Trabajo Monográfico de Licenciatura y aprobada como requisito para obtener el grado de:

LICENCIADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

COMITÉ DE MONOGRAFIA

DIRECTOR: _____
Dr. José Manuel Carrión Jiménez

ASESOR: _____
Q.F.B. José Luís González Bucio

ASESOR: _____
Dr. José Alfonzo Canche Uuh

Chetumal, Quintana Roo, Noviembre 2011

Dedico este trabajo a:

Mis padres y hermanos por ser mi fuerza para culminar cada anhelo y enfrentar las situaciones complicadas pero importantes de la vida. Son mis maestros y ejemplos a seguir.

Mi tía Rosa Maria Gorocica Moreno y Lilia Concepción Vera Polanco, mi amigo Mario quienes se adelantaron al tiempo en este proyecto llamado vida pero que seguramente desde el cielo se encuentran orgullosos de este logro.

A cada Maestro que permitió satisfacer mi sed de conocimientos en especial a la profesora Jacqueline.



AGRADECIMIENTOS

A Dios por todas las bendiciones y situaciones adversas que me hacen ser el ser humano que soy ahora.

A mis padre Elias Vera Polanco y Martha Gorocica Moreno. Papá, Mamá Gracias; por su ejemplo, consejos, regaños, desvelos, apoyo, por creer siempre en mí, pero sobre todo por ser mis padres y ser como son.

Mamá, Papá esta Licenciatura también es suya.

A mis Asesores Q.F.B. José Luis González Bucio y Dr. José Alfonso Canche Uuh de manera especial a mi director de Monografía Dr. José Manuel Carrión Jiménez por su tiempo, conocimientos, paciencia, en fin por el apoyo incondicional brindado para la culminación de este trabajo, que sin duda es fruto de todo ese apoyo.

A mis profesores MC. Martin Rivero gracias por su compromiso, honestidad y motivación. Al profesor M.I.A. Juan C. Avila, al M.E.C. Roberto Acosta, al Dr. Omar Yam por ser parte invaluable de mi paso por la Universidad siendo mis guías. A todos los profesores que de algún modo constituyeron parte de mi formación académica.



A mis amigas Giany, Marisol, Pilar y mis compañeros de la Carrera de Ing. en Sistemas de Energía por su paciencia, tolerancia y por brindarme su amistad que yo llamaría hermandad creando en estos 4 años momentos y vínculos inolvidables que ni el tiempo ni la distancia borrarán.

A una persona especial que ya es como de la Familia, Eduardo; gracias por la motivación, consejos, regaños y apoyo.

Al área de Recursos Materiales Peninsular Banorte por el apoyo y paciencia brindados para la culminación de mi Monografía.

A todos estas persona; MUCHAS GRACIAS por formar parte de mi vida y contribuir a este logro.



Contenido

Introducción	i
Justificación	v
Objetivo General	vi
Objetivos Particulares	vi
Metodología	vii
Capítulo 1	
1.1 Método de Reactor de flujo continuo sin recirculación	1
1.2 Nomenclatura	1
1.3 Metodología	2
1.4 Ejemplo de estimación de parámetros mediante el método de Reactor	4
1.5 Procedimiento	5
Capítulo 2	
2.1 Método Respirométrico Extant	10
2.2 Método Extant para la Estimación de Parámetros Cinéticos y Estequiométricos del Proceso Heterótrofo	11
2.3 Nomenclatura	11
2.4 Metodología	12
2.5 Ejemplo de estimación de parámetros para el proceso Heterótrofo mediante el Método Extant	15
2.6 Estimación de parámetros en el Respirómetro del proceso Nitrificante Mediante el Modelo de Chandran	17
2.7 Ejemplo de estimación de parámetros para el proceso Nitrificante mediante el Método Extant	19



Capítulo 3

3.1 Método de Pulsos	21
3.2 Nomenclatura	21
3.3 Metodología...	22

Capítulo 4

4.1 Comparación de los Métodos descritos y Modelación del proceso de Lodos Activados	29
4.2 Ventajas y Desventajas de los Métodos Descritos	29

Capítulo 5

5.1 Modelación del proceso de Lodos Activados con SuperProDesigner	30
---	-----------

Bibliografía	35
---------------------	-----------



INTRODUCCIÓN

Actualmente uno de los problemas que más preocupa a la humanidad son las grandes cantidades de contaminantes que se desechan en el agua. El tratamiento de aguas residuales es de gran importancia ya que ofrece una alternativa de solución a éstos problemas; para que esto se logre se recurre a muchos métodos de los cuales los más utilizados son los que involucran microorganismos debido a que son económicos, eficientes y no generan subproductos contaminantes (López, 1981). Un proceso biológico muy ampliamente utilizado en el tratamiento de las aguas residuales municipales es el de lodos activados en ambiente aerobio, tanto en industrias como en zonas urbanas desde hace aproximadamente un siglo (Ramalho, 1993). El empleo de lodos activados ofrece una alternativa eficaz para el tratamiento de aguas residuales ya que poseen una gran variedad de microorganismos capaces de remover materia orgánica presente en el agua (Ganczarczyk, 1983), esto se ve favorecido por el uso de reactores que proveen las condiciones necesarias para la biodegradación. El proceso de lodos activados tiene como objetivo la remoción de materia orgánica de las aguas residuales. La combinación de microorganismos y agua residual se conoce como lodos activados, es decir que cualquier agua residual, industrial o urbana sometida a aireación durante un período de tiempo reducirá su contenido de materia orgánica (Eckenfelder, 1970). El proceso de lodos activados es un proceso mecanizado y construido en plantas de concreto por el cual el agua residual y el lodo biológico (microorganismos) son mezclados y aireados en un tanque denominado reactor y en general produce efluentes de mejor calidad que otros procesos como los procesos anaerobios o las lagunas.

El proceso de lodos activados consiste de un reactor biológico, donde la biomasa producida en el reactor es separada y recirculada al reactor, las condiciones aerobias en el reactor permiten el crecimiento de microorganismos heterótrofos y autótrofos aerobios. La caracterización del reactor se realiza a través de la estimación de parámetros cinéticos característicos del proceso biológico. Los



parámetros cinéticos manifiestan el comportamiento de los lodos activados al desarrollarse en determinada agua residual. La estimación correcta de los parámetros cinéticos del proceso permite el diseño, control y optimización del sistema de lodos activados. En efecto con ayuda de estos parámetros se puede calcular la carga de oxígeno (kg/d) que los lodos biológicos requieren para oxidar la materia orgánica presente; los kilogramos de lodos producidos por la oxidación de la materia orgánica contaminante; las velocidades de remoción de los contaminantes; igualmente, a partir de estos parámetros, podemos conocer otros datos importantes con relación a la ingeniería básica del sistema de tratamiento, como son: los tiempos de residencia en el biorreactor; el volumen del biorreactor; la capacidad del sistema de aireación; la capacidad de recirculación de lodos al biorreactor; la carga de lodos que es preciso desechar y la potencia necesaria para airear el reactor de lodos activados. La Figura 1 presenta un diagrama de proceso típico para una planta de tratamiento de aguas residuales municipales. Como se muestra en la Figura, los dos factores importantes que influyen en los costos de operación son el suministro de aire y en menor medida la producción de lodos a tratar; de aquí se resalta la importancia de la estimación de parámetros cinéticos, ya que como se mencionó anteriormente, estos permiten estimar los costos de operación por los dos factores mencionados.

El diseño de un sistema de lodos se basa en los parámetros cinéticos, que se deben obtener experimentalmente con el agua residual por tratar. Estos datos experimentales obtenidos se utilizan para ajustar un modelo de cinética de remoción, señalados anteriormente. Para diseñar tratamientos biológicos es de vital importancia conocer el comportamiento de los microorganismos, es decir, su cinética. En contraste con las técnicas clásicas, uno de los métodos más rápidos y sencillos para el cálculo de parámetros cinéticos, son los ensayos respirométricos. Estos métodos miden e interpretan la velocidad de respiración de los microorganismos, la cual refleja dos de los más importantes procesos bioquímicos que ocurren en las plantas de tratamiento: el crecimiento de la biomasa y el



consumo de sustrato (Langergraber et al., 2003). La estimación de los parámetros cinéticos del proceso de lodos activados se realiza mediante la toma de una porción del lodo del reactor biológico. Esta muestra de lodo es llevada en forma inmediata al laboratorio, donde se coloca en un reactor de vidrio aireado y mediante un método específico se estiman los parámetros cinéticos y estequiométricos del proceso biológico.

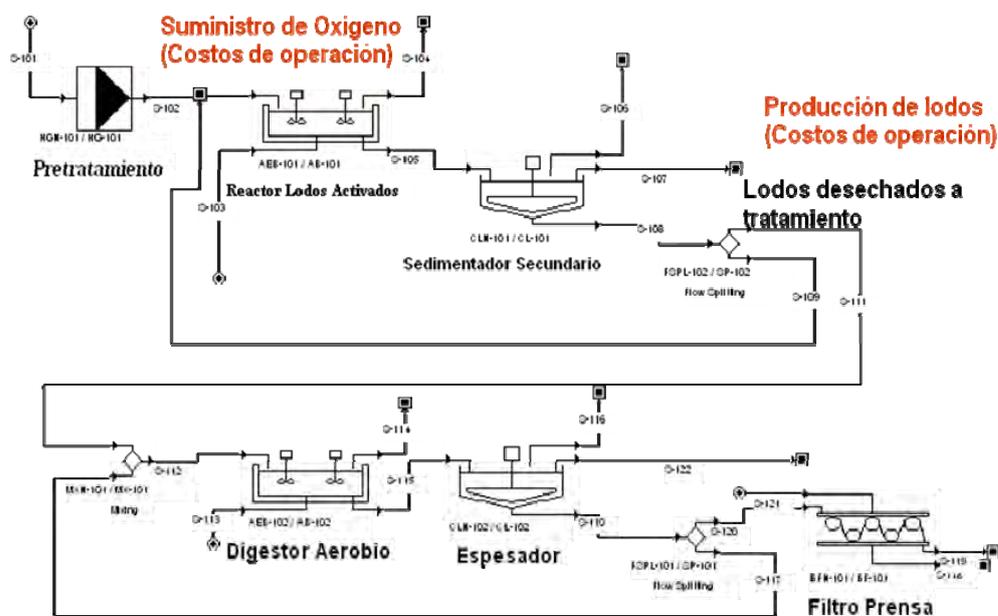


Figura 1.- Esquema de una Planta de tratamiento de aguas residuales municipales típica. La aireación y la producción de lodos son los factores económicos más importantes a tomar en cuenta.

La ventaja principal de los métodos respirométricos es la rapidez y exactitud con que se estiman los parámetros cinéticos y estequiométricos, no solo del proceso de remoción de materia orgánica sino también del proceso de nitrificación del



reactor de lodos activados. Además con estos métodos es posible monitorear el proceso de lodos activados in-situ y detectar problemas de remoción biológica por sustancias inhibitorias del proceso. Adicionalmente la estimación de estos parámetros permite la modelación y optimización del proceso de lodos activados en programas especialmente diseñados para ello. Actualmente existen programas como GPS-X (Hidromantis Inc., USA) y SuperproDesigner (Intelligen Inc., USA) con los cuales es posible diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales o en el caso de una planta ya construida simular los diferentes procesos que se realizan en ella. Sin embargo en estos programas es necesario suministrar datos de parámetros tanto estequiométricos como cinéticos para realizar una simulación adecuada o realizar una optimización del proceso ya existente, resaltando así la estimación de dichos parámetros.



JUSTIFICACIÓN

Al concluir los estudios de Ingeniería Ambiental, y con los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera y las practicas de campo en las que he participado, tengo la posibilidad de contribuir a la generación de material de apoyo con esta monografía, la cual tiene la finalidad de servir como fuente bibliográfica y de consulta para el alumnado de la UQROO y público en general, interesado en el área de ingeniera ambiental enfocadas al diseño de plantas y tratamiento de aguas residuales, ya sea de manera practica o teórica.

Es de suma importancia para el tratamiento de aguas residuales con sistemas de lodos activados el conocimiento de ciertas características propias de los métodos que son utilizados a lo largo del proceso de tratamiento de estas aguas, por lo cual en esta monografía, se plasman diversos métodos aplicables para la estimación de parámetros cinéticos en reactores de lodos activados. Los parámetros cinéticos manifiestan el comportamiento de los lodos activados al desarrollarse en determinada agua residual, por ello estimar de manera óptima los parámetros permite en forma adecuada el diseño, control y optimización del sistema de lodos activados. Todo lo anterior para poder eficientizar y reducir recursos en los procesos comunes que se utilizan hoy día en el tratamiento de aguas residuales.



OBJETIVO GENERAL

- ❖ Realizar una investigación bibliográfica sobre los diferentes métodos, para la estimación de parámetros cinéticos de los reactores de lodos activados.

OBJETIVO PARTICULARES

- ❖ Describir de forma detallada tres métodos utilizados en estimación de parámetros, convencionales y novedosos para estimar parámetros cinéticos en reactores de lodos activados.
- ❖ Realizar un análisis comparativo de los tres métodos descritos.
- ❖ Describir el método de simulación del proceso de lodos activados mediante los parámetros cinéticos estimados en el programa Super ProDesigner.



METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo se plantean los siguientes procedimientos:

- ❖ Descripción de los métodos a utilizar en la estimación de parámetros cinéticos en reactores de lodos activados.

Se describirán los métodos investigados definiendo la metodología utilizada en cada uno de ellos detallando los parámetros cinéticos que es posible estimar y los requerimientos de equipo, así como las mediciones necesarias para la estimación.

- ❖ Análisis comparativo de los métodos.

Una vez descritos los métodos, se analizarán los diferentes métodos para detallar sus ventajas y sus desventajas en la estimación de parámetros cinéticos.

- ❖ Descripción de la simulación de un sistema de lodos activados en el programa Super ProDesigner.

Con los datos obtenidos anteriormente para cada parámetro, se describirá el procedimiento para realizar una simulación del proceso de lodos activados utilizando los parámetros cinéticos estimados con los métodos descritos.



CAPÍTULO 1

1.1 MÉTODO DE REACTOR DE FLUJO CONTINUO SIN RECIRCULACIÓN

Los sistemas de lodos activados usan comunidades microbianas mixtas que involucran interacciones complejas entre sus miembros como consecuencias de características físicas del sistema y la manera en la cual este es operado determinarán la composición y el estado fisiológico de los microorganismos en esa comunidad. La naturaleza de la comunidad microbiana y el estado de los organismos en la comunidad define la cinética exhibida por esta, lo cual determinara el funcionamiento del sistema. Los estudios en laboratorio utilizando biorreactores y respirómetros alimentados con biomasa obtenida directamente de un reactor de lodos activados a escala completa suministraran información esencial para un diseño exitoso o la evaluación del sistema. En este capítulo se describirá el método de reactor de flujo continuo sin recirculación (Crites y Tchobanoglous, 2008) utilizado en la estimación de parámetros cinéticos y estequiometricos en reactores de lodos activados utilizados en plantas de tratamiento de aguas residuales.

1.2 NOMENCLATURA

K = Velocidad máxima de consumo de sustrato por unidad de masa de microorganismos [T^{-1}]

K_d = Constante de decaimiento [T^{-1}]

K_s = Constante de afinidad del sustrato [$M L^{-3}$]

Q = Caudal [$L^3 T^{-1}$]

S_o = Concentración de materia orgánica medida como Demanda Química de Oxígeno (DQO) a la entrada del reactor [$M L^{-3}$]



S = Concentración de materia orgánica medida como DQO a la salida del reactor
[M L⁻³]

μ_{\max} = velocidad de crecimiento específica máxima [T⁻¹]

V = Volumen del reactor [L³]

V_L = Volumen de lodos activados de la muestra tomada del reactor biológico de la planta de tratamiento [L³]

X = Concentración de microorganismos ó Biomasa [M L⁻³]

Y = Rendimiento celular [--]

θ = tiempo de residencia hidráulico [T]

1.3 METODOLOGÍA

Mediante éste método es posible estimar los parámetros cinéticos k , K_s y K_d y el parámetro estequiométrico Y . El procedimiento es el siguiente

1.- Un volumen medido de lodos activados (V_L) proveniente del reactor biológico de la planta de tratamiento es colocado en un reactor de flujo continuo y mezcla completa sin recirculación como el mostrado en la Figura 1.1 y se le suministra aire mediante un difusor poroso.

2.- Posteriormente el reactor se alimenta con agua residual sintética esterilizada (agua con una concentración conocida de materia orgánica) a un caudal constante mediante una bomba peristáltica hasta obtener un funcionamiento estacionario del reactor. La condición estacionaria se observa cuando las concentraciones medidas de DQO y de biomasa a la salida del reactor se mantienen sin variación significativa.

3.- Bajo condición estacionaria se determina el tiempo de residencia hidráulico del reactor (θ) mediante la siguiente ecuación:



$$\theta = \frac{V_L}{Q} \quad (1.1)$$

4.- Se mide la concentración de materia orgánica a la entrada y a la salida del reactor y la concentración de biomasa (X) en el reactor. La biomasa en el reactor se mide como Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV).

5.- El procedimiento descrito se repite varias veces a diferentes tiempos de residencia hidráulicos, el tiempo de residencia hidráulico se modifica simplemente variando el caudal en el reactor. El modificar el tiempo de residencia en el reactor ocasiona una variación en la concentración de materia orgánica en el efluente del reactor.

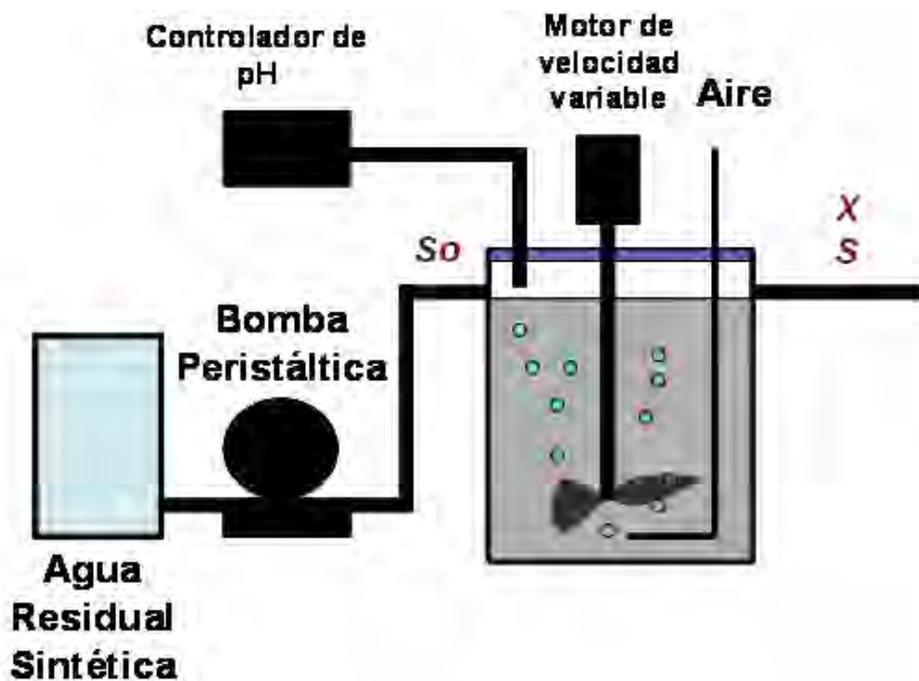


Figura 1.1 Arreglo experimental usado en el método de reactor de flujo continuo sin recirculación.



1.4 EJEMPLO DE ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS MEDIANTE EL MÉTODO DE REACTOR

En este ejemplo se describe en forma detallada la estimación de parámetros cinéticos y estequiométricos mediante el método de reactor de mezcla completa sin recirculación con un agua residual sintética, con una concentración de 400 mg L⁻¹ DQO alimentada al reactor. Como se describe en la metodología al variar el caudal, el tiempo de residencia hidráulico cambia también originando variaciones en la concentración de materia orgánica y de biomasa a la salida del reactor. Estos datos experimentales fueron tomados de Crites y Tchobanoglous (2007) y son mostrados en la Tabla 1.1 El experimento consistió de 5 ensayos.

Tabla 1.1 Valores de Materia Orgánica Soluble, biomasa y tiempo de residencia hidráulico medidos en un reactor de mezcla completa sin recirculación.

Ensayo	S_0 (mg DQO L ⁻¹)	S (mg DQO L ⁻¹)	θ (d)	X (mg SSV L ⁻¹)
1	400	13	3.2	123
2	400	24	2.0	127
3	400	33	1.6	127
4	400	47	1.3	124
5	400	66	1.1	119



1.5 PROCEDIMIENTO

a) Calcular los parámetros K_S y K .

Mediante un balance de materia sobre el sustrato y la biomasa en el reactor se obtiene la ecuación siguiente:

$$\frac{X\theta}{S_0 - S} = \frac{K_S}{K} \frac{1}{S} + \frac{1}{K} \quad (1.2)$$

Donde:

$$K = \frac{\mu_{\max}}{Y}$$

La ecuación (1.2) se puede linearizar como

$$P = \frac{X\theta}{S_0 - S} \quad , \quad m = \frac{K_S}{K} \quad , \quad T = \frac{1}{S} \quad , \quad b = \frac{1}{K}$$

Por lo cual la ecuación (1.2) se puede expresar como una ecuación de una línea recta:

$$P = mT + b \quad (1.3)$$

Los valores de las variables P y T se calculan a partir de los datos experimentales mostrados en la Tabla (1.1) con estos datos se grafica T vs P y se ajusta a una ecuación de línea recta, con el objetivo de hallar los valores de m y b . Los valores de P y T son mostrados en la Tabla (1.2).



Tabla 1.2.- Valores de P y T calculados a partir de datos experimentales del reactor.

Ensayo	S_o-S (mg DQO L ⁻¹)	θX (mg SSV L ⁻¹ d)	$\theta X/S_o-S$ (mg DQO ⁻¹ mg SSV d)	I/S (mgDQO ⁻¹ L)
1	387	393.6	1.017	0.077
2	376	254.0	0.676	0.042
3	367	203.2	0.554	0.030
4	353	161.2	0.457	0.021
5	334	130.9	0.392	0.015

La Figura 1.2 muestra el ajuste realizado a los valores calculados de P y T y los respectivos valores de los parámetros de ajuste m y b , con el inverso del valor de b se obtiene un valor de 4.04 d⁻¹ para K con éste valor y mediante el parámetro m se obtiene un valor de 40.5 mg DQO L⁻¹ para K_s .

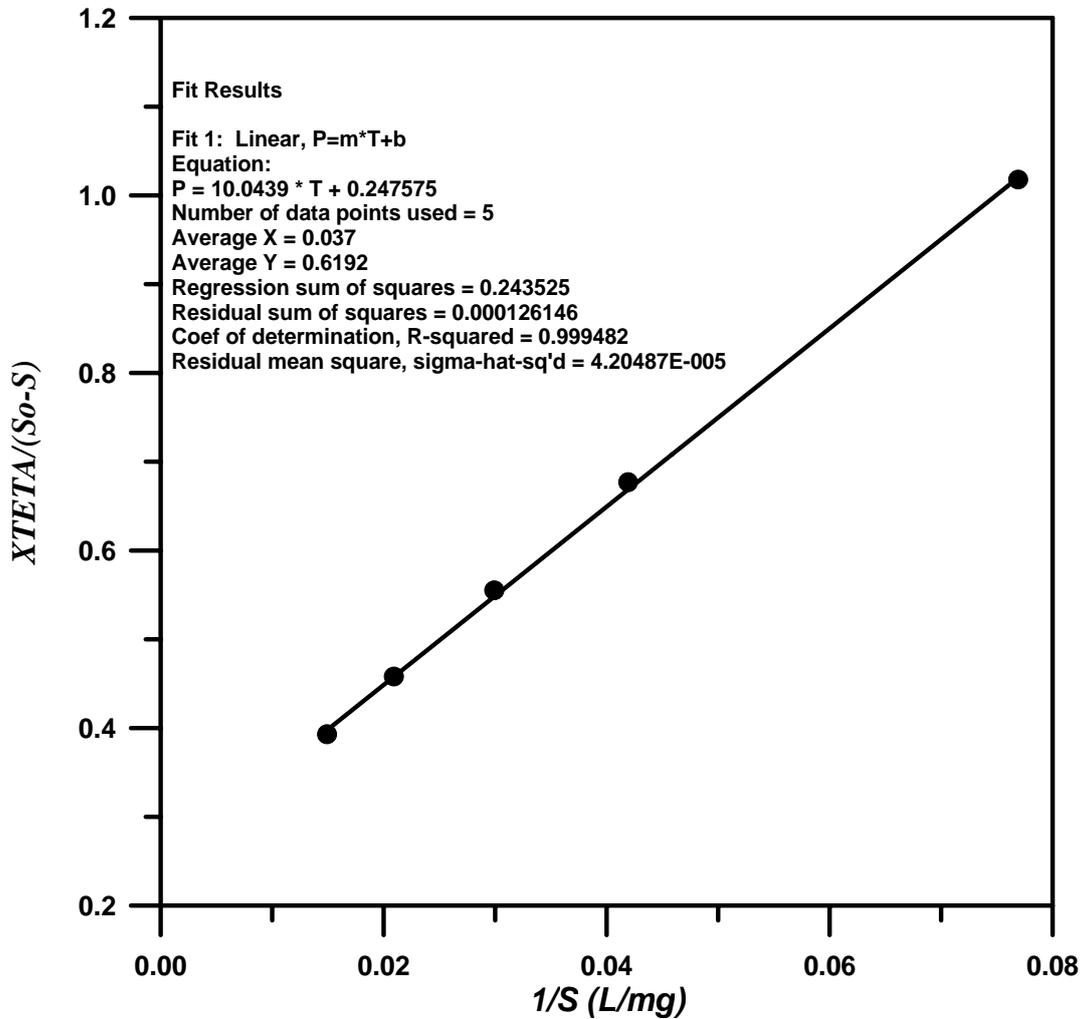


Figura 1.2 ajuste lineal a la ecuación (1.2)

b) determinar los coeficientes Y y K_d

Nuevamente mediante un balance de materia sobre el sustrato y la biomasa en el reactor se obtiene la siguiente ecuación:



$$\frac{1}{\theta} = Y \frac{S_0 - S}{X\theta} - Kd \quad (1.3)$$

Esta ecuación al igual que la ecuación (1.2) se puede linearizar mediante:

$$P = \frac{1}{\theta} \quad , \quad m = Y \quad , \quad T = \frac{S_0 - S}{X\theta} \quad b = Kd$$

La Tabla 1.3 muestra los valores calculados de $1/\theta$ y de $S_0 - S / (X\theta)$ en el reactor.

Tabla 1.3.- Valores calculados de $1/\theta$ y de $S_0 - S / (X\theta)$ en el reactor.

Ensayo	$1/\theta$ (d ⁻¹)	$S_0 - S / \theta X$ (d ⁻¹)
1	0.313	0.983
2	0.500	1.480
3	0.625	1.806
4	0.769	2.190
5	0.909	2.552

La Figura 1.3 muestra el ajuste lineal a los valores de la Tabla (1.3), del ajuste se obtiene en forma inmediata que Y es igual a 0.38 y Kd a 0.06 d⁻¹.

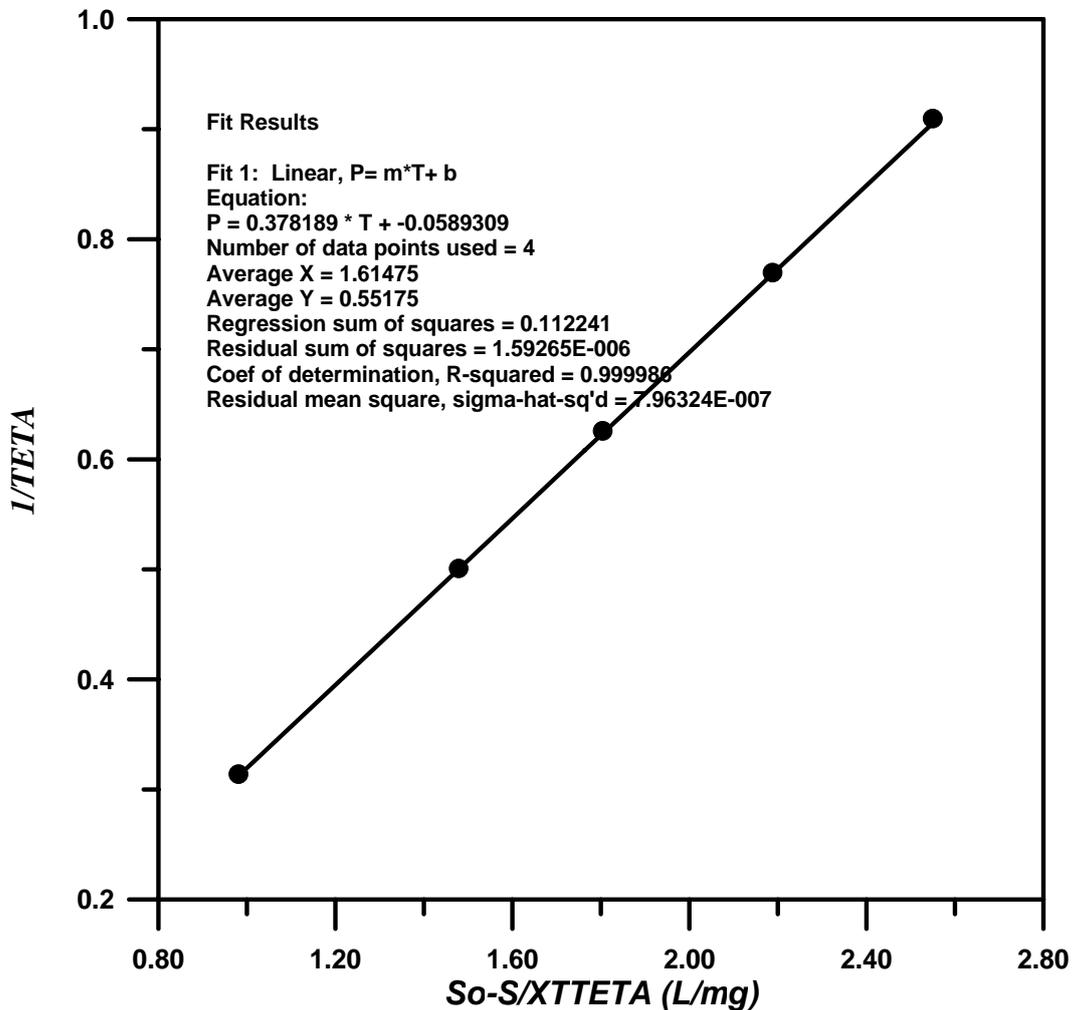


Figura 1.3 Ajuste lineal para obtener los parámetros Y y K_d .

En este ejemplo, los coeficientes cinéticos fueron estimados a partir de datos obtenidos en reactores de mezcla completa en laboratorio a escala sin recirculación. Se puede obtener datos similares para reactores de mezcla completa en flujo continuo con recirculación. Los reactores con recirculación tienen la ventaja que el tiempo promedio de retención celular puede variar en forma independiente del tiempo de retención hidráulica. La desventaja radica en que los reactores pequeños de laboratorio que funcionan con recirculación son difíciles de controlar



CAPÍTULO 2

2.1 MÉTODO RESPIROMÉTRICO EXTANT

La habilidad de predecir la calidad del efluente de sistemas de lodos activados requiere de modelos cinéticos exactos y reproducibles para estimar parámetros cinéticos y estequiométricos de los diferentes procesos biológicos que se realizan en el reactor de lodos activados. Existen diferentes modelos que pueden predecir exitosamente la calidad del proceso de lodos activados. Estos modelos han sido recientemente incorporados en el desarrollo de métodos respirométricos que permitan la estimación rápida exacta y precisa de dichos parámetros. Los métodos respirométricos se basan en la medición de la velocidad de consumo de oxígeno de los microorganismos aerobios presentes en el licor mixto de los reactores de lodos activados. En este capítulo se presenta y se describe en forma detallada el método respirométrico Extant, éste método tiene la ventaja de ser un método rápido, preciso y que puede ser utilizado tanto para estimar parámetros cinéticos del proceso de remoción de materia orgánica, como del proceso de nitrificación en reactores de lodos activados. El proceso de nitrificación, el cual consiste en la remoción de Amonio del agua residual en el reactor biológico, es importante para lograr un efluente de mejor calidad del agua residual que llega a un proceso de lodos activados, por lo cual en simulaciones de plantas de tratamiento con sistemas de lodos activados se incorpora la nitrificación como proceso importante, siendo requerida la estimación de los parámetros cinéticos de dicho proceso. A continuación se describirá en forma detallada el método extant para la estimación de parámetros cinéticos y estequiométricos para la remoción de materia orgánica soluble (De Bel, 1987) y para el proceso de nitrificación (Chandran y col. 2001).



2.2 MÉTODO EXTANT PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS CINÉTICOS Y ESTEQUIOMÉTRICOS DEL PROCESO HETERÓTROFO

Material Requerido

En los métodos respirométricos se requiere de un respirómetro equipado como el que se muestra en la Figura 2.1. El respirómetro es un reactor de vidrio de volumen adecuado (1.5 a 7 L) equipado con un motor de agitación variable para mantener condiciones de mezcla completa en el respirómetro. El aire se suministra al respirométero mediante un difusor poroso colocado en la parte inferior del respirómetro. El pH en el respirómetro debe ser controlado mediante un sistema electrónico controlador de pH para prevenir variaciones del pH durante los ensayos respirométricos, ya que en caso de presentarse variaciones del pH la cinética de consumo de los microorganismos cambiará y la estimación de los parámetros del proceso no será confiable. Se debe colocar un electrodo de oxígeno disuelto en el respirómetro con un tiempo de respuesta adecuado y con una sensibilidad de $0.01 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$. Las lecturas de oxígeno disuelto en el respirómetro deben ser almacenadas en una computadora mediante un sistema de adquisición de datos.

2.3 NOMENCLATURA

K_S = Constante de afinidad del sustrato [M L^{-3}]

S = Concentración de materia orgánica medida como Demanda Química de Oxígeno (DQO) [M L^{-3}]

μ_{max} = velocidad de crecimiento específica máxima [T^{-1}]

V = Volumen del reactor [L^3]

V_L = Volumen de lodos activados de la muestra tomada del reactor biológico de la planta de tratamiento [L^3]

X = Concentración de microorganismos ó Biomasa [M L^{-3}]



f_s = coeficiente de rendimiento celular [--]

2.4 METODOLOGÍA

- 1.- Se toma una muestra del licor mixto directamente del reactor de lodos activados de la planta de tratamiento y se coloca en el respirómetro y se mide la concentración de microorganismos como DQO y SSV.
- 2.- En forma inmediata se inicia la aireación en el respirómetro y se monitorea el Oxígeno Disuelto. Cuando la lectura de Oxígeno Disuelto (O.D.) se encuentra estable se inician los ensayos respirométricos.
- 3.- En el método Extant cuando las lecturas de O.D. no varían significativamente se adiciona un pulso de sustrato orgánico y se interrumpe al mismo tiempo la aireación en el respirómetro. El pulso consiste en la adición de un volumen medido proveniente de una solución con una concentración conocida de materia orgánica soluble, por lo cual es posible calcular la concentración inicial de materia orgánica en el respirómetro debida al pulso. La adición del pulso origina una caída en el O.D. en el respirómetro debido a un aumento en la velocidad de consumo de oxígeno de la biomasa.
- 4.- Las lecturas de oxígeno disuelto se almacenan en la computadora y se reinicia la aireación en el respirómetro para realizar otro ensayo.
- 5.- Con los datos experimentales de O.D. se calcula el oxígeno consumido durante el proceso de consumo del pulso de sustrato mediante:

$$OU = C_{ob} - C_o(t) \quad (2.1)$$



Donde OU es el oxígeno consumido, Cob es la concentración de oxígeno disuelto al momento de adicionar el pulso y $Co(t)$ es la concentración de oxígeno disuelto en el tiempo t . A partir de estos datos se genera un perfil experimental del Oxígeno Consumido.

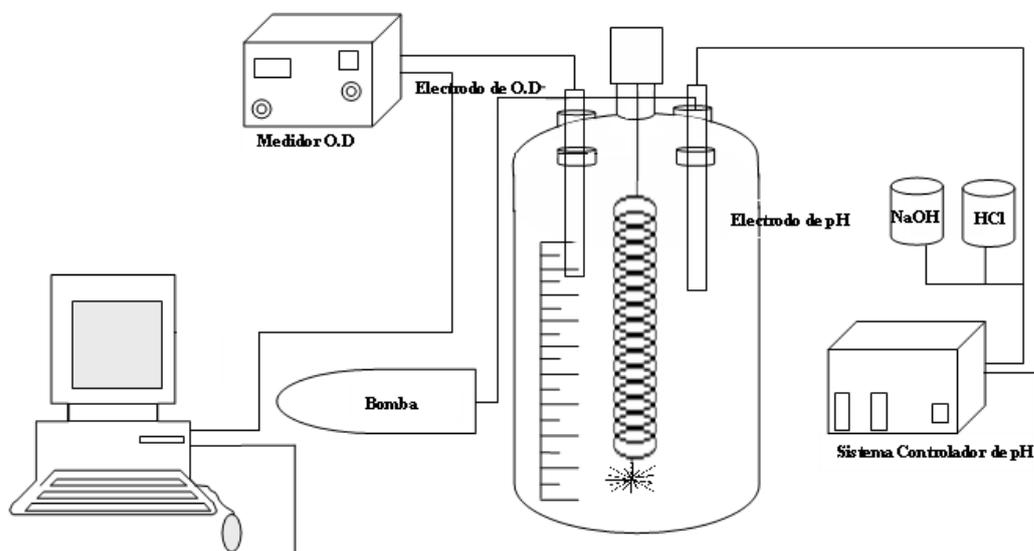


Figura 2.1.- Respirómetro típico para estimar parámetros cinéticos de reactores de lodos activados.

6.- Se calcula el coeficiente de rendimiento celular mediante la siguiente ecuación:



$$f_s = \frac{S - OU_f}{S}$$

2.2

Donde OU_f es el Oxígeno Consumido final

7.- Mediante un balance de materia sobre el sustrato y la biomasa incorporando la ecuación de Monod, se obtienen las siguientes ecuaciones diferenciales teóricas

$$\frac{dS}{dt} = - \frac{1}{f_s} \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S} X \quad (2.3)$$

$$\frac{dOU}{dt} = \frac{(1 - f_s)}{f_s} \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S} X \quad (2.4)$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S} X \quad (2.5)$$

Sujetas a las condiciones iniciales $S(t=0) = S_0$, $OU(t=0) = 0$ y $X(t=0) = X_0$. Donde S_0 y X_0 son las concentraciones de sustrato y de biomasa al inicio del experimento respirométrico respectivamente. El perfil OU experimental generado mediante la ecuación (2.1) es ajustado mediante las ecuaciones (2.3), (2.4) y (2.5) con el objetivo de estimar μ_{\max} y K_s .



2.5 EJEMPLO DE ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL PROCESO HETERÓTROFO MEDIANTE EL MÉTODO EXTANT

En esta parte se describe la aplicación del Método Extant mediante un ejemplo utilizando los datos reportados por Kong y colaboradores (1996) para un ensayo respirométrico usando un pulso de 3.5 mg DQO L⁻¹. La Figura (2.2) presenta los datos experimentales de dicho ensayo y la flecha señala el momento en que el pulso de sustrato orgánico es adicionado. El sustrato orgánico fue preparado con Acetato de Sodio. La Figura 2.3 muestra el perfil experimental de oxígeno consumido (*OU*) construido con los datos mostrados en la Figura (2.2) mediante la ecuación (2.1). Los datos experimentales de *OU* representados por los puntos negros fueron ajustados mediante las ecuaciones (2.3), (2.4) y (2.5) mediante el programa Model Maker (Cherwell Scientific, USA). El perfil *OU* teórico es descrito en la Figura (2.3) por la línea sólida. Las condiciones iniciales en éste ejemplo fueron: $S_0 = 3.5$ mg DQO L⁻¹, $X_0 = 3560$ mg DQO L⁻¹ y $OU_0 = 0$. Los datos de la optimización del programa son los siguientes:

Optimization

Model: datosKong.mod

Method: Simplex

Initial Value: $K_s = 56.393$

Initial Value: $u_{max} = 0.0091157$

$S_0 = 3.5$, $X_0 = 3567$, $f_s = 0.44$, $OU_0 = 0$

Convergent steps = 10.

Running the model with parameter values as follows:

Vertex Value $K_s = 56.38$

Vertex Value $u_{max} = 0.0090988$

Calculated value for WSS = 0.051006



The Simplex Optimization completed successfully after 10 convergent steps

Optimized Value $K_s = 56.47$ units: mg DQO L^{-1}

Optimized Value $u_{\text{max}} = 0.0091055$ units: min^{-1}

Statistics:

F-Value = 6937, P-Value < 0.001, $r^2 = 0.9950$

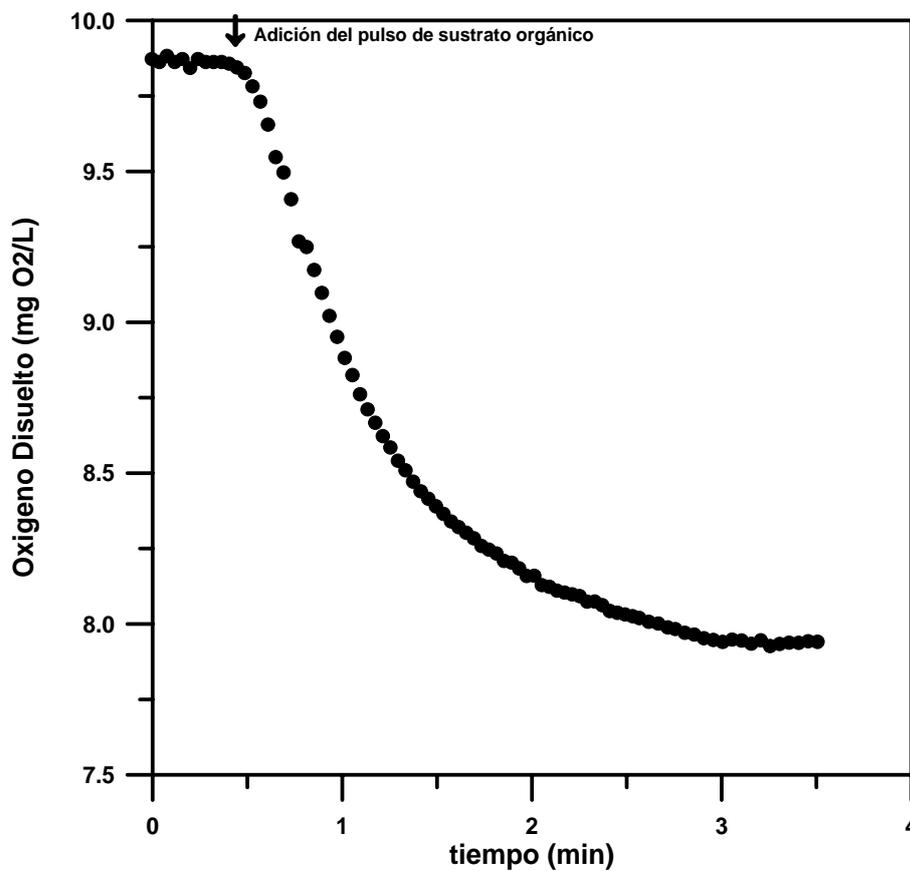


Figura 2.2.- Datos de oxígeno disuelto utilizados para ejemplificar el Método Extant

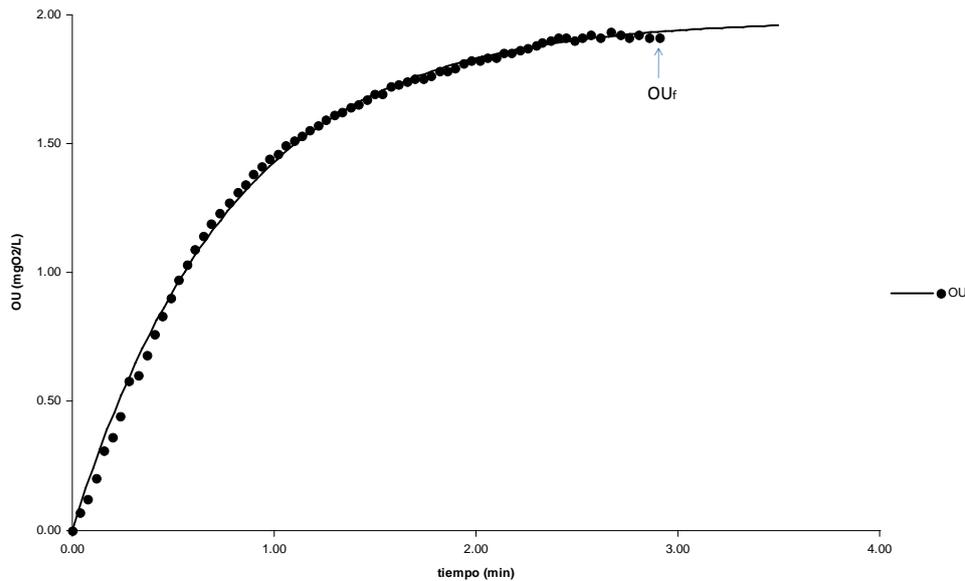


Figura 2.3.- Ajuste de los datos experimentales de Oxígeno consumido mediante el Método Extant.

2.6 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS EN EL RESPIRÓMETRO DEL PROCESO NITRIFICANTE MEDIANTE EL MODELO DE CHANDRAN.

La estimación de parámetros cinéticos del proceso de nitrificación en sistemas de lodos activados se puede realizar mediante el método desarrollado por Chandran y Col. (2001).

En este modelo el balance de materia del sustrato, la biomasa y del oxígeno consumido en el respirómetro se describe mediante:



$$\frac{dS}{dt} = - \frac{1 + (0.4 * fs)}{fs} \mu_{max} \frac{S}{K_s + S} X \quad (2.6)$$

$$\frac{dOU}{dt} = \frac{(1 - fs)}{fs} \mu_{max} \frac{S}{K_s + S} X \quad (2.7)$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu_{max} \frac{S}{K_s + S} X \quad (2.8)$$

Para las ecuaciones de este modelo S es la concentración de Amonio (mg NOD/L^{-1}), donde NOD es la demanda de oxígeno para oxidar el amonio y 1 mg N-NH_4^+ equivale a 4.57 mg NOD . μ_{max} es la velocidad específica máxima de crecimiento (min^{-1}), fs es el coeficiente de rendimiento celular para la oxidación del N-NH_4^+ a N-NO_3^- ($\text{mg DQO mg NOD}^{-1}$), X es la concentración de biomasa (mg DQO L^{-1}), K_s es la constante de afinidad por sustrato (mg NOD L^{-1}), OU_f es el oxígeno consumido final ($\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$) y OU es el oxígeno consumido ($\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$). El procedimiento de estimación de parámetros con éste método es similar al procedimiento descrito anteriormente para el proceso heterótrofo solo cambia en la ecuación para estimar el coeficiente de rendimiento celular que para el caso del proceso nitrificante se calcula como:

$$fs = \frac{(S - OU_f)}{(S + .4OU_f)} \quad (2.9)$$



2.7 EJEMPLO DE ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL PROCESO NITRIFICANTE MEDIANTE EL MÉTODO EXTANT

La Figura (2.4) presenta los datos experimentales de oxígeno consumido obtenidos por Josías Gutiérrez (2010) para un pulso de amonio de $0.5 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ L}^{-1}$ obtenidos en el respirómetro mostrado en la Figura (2.5). La línea sólida representa el ajuste a los datos experimentales mediante las ecuaciones (2.6), (2.7) y (2.8). El ajuste se realizó mediante las condiciones iniciales $S_0 = 2.3 \text{ mg NOD L}^{-1}$, $X_0 = 3100 \text{ mg DQO L}^{-1}$ y $OU_0 = 0$. El valor de f_s estimado fue de $0.11 \text{ mg DQO mg NOD}^{-1}$, mientras que se obtuvo un valor de $3.35 \times 10^{-5} \text{ min}^{-1}$ para μ_{max} y de $.47 \text{ mg NOD L}^{-1}$ para K_s con un r^2 de 0.9916

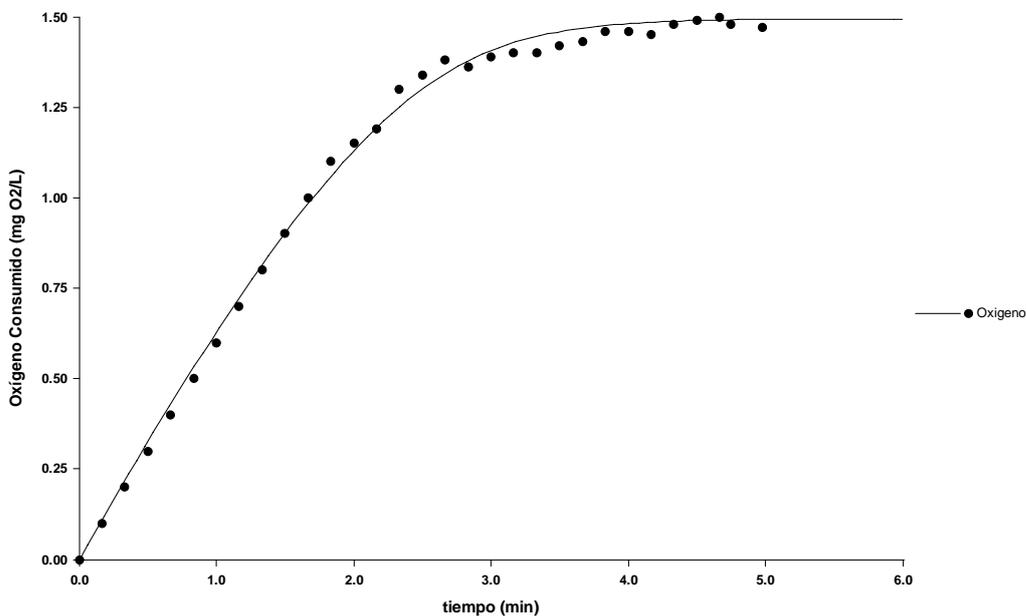


Figura 2.4.- Ejemplo de un ajuste a los datos de oxígeno consumido para estimar parámetros cinéticos y estequiométricos del proceso nitrificante en reactores de lodos activados.



Figura 2.5.- Respirómetro utilizado para estimar parámetros del proceso nitrificante del ejemplo descrito.



CAPÍTULO 3

3.1 METODO DE PULSOS

La estimación de los parámetros cinéticos de lodos activados se puede realizar por el método respirométrico de pulsos (Gearney y col., 2001). En éste Método se utiliza un respirómetro como el mostrado en la Figura (2.1) y al igual que en el Método Extant se adiciona un pulso de sustrato de concentración conocida. Sin embargo éste Método requiere un experimento previo para calcular el coeficiente de transferencia de masa volumétrico (K_La). Debido a que éste Método es más complejo, se describirá la metodología incorporando los datos experimentales de un experimento de pulsos, realizado en muestra de lodos activados obtenidos del reactor de lodos activados de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales "Centenario". Estos datos experimentales fueron tomados de la Tesis de Licenciatura realizada por Tejero Gómez (2007).

3.2 NOMENCLATURA

C_o = Concentración de oxígeno disuelto [$M L^{-3}$]

C_{ob} = Concentración de oxígeno disuelto de línea base [$M L^{-3}$]

K_La = Coeficiente de transferencia de masa volumétrico [T^{-1}]

K_s = Constante de afinidad del sustrato [$M L^{-3}$]

S = Concentración de materia orgánica medida como Demanda Química de Oxígeno (DQO) [$M L^{-3}$]

QO_2X = Velocidad de consumo de oxígeno endógena [$M L^{-3} T^{-1}$]

QO_2X_{exo} = Velocidad de consumo de oxígeno exógena [$M L^{-3} T^{-1}$]

μ_{max} = Velocidad de crecimiento específica máxima [T^{-1}]

V = Volumen del reactor [L^3]

V_L = Volumen de lodos activados de la muestra tomada del reactor biológico de la planta de tratamiento [L^3]



X = Concentración de microorganismos ó Biomasa [$M L^{-3}$]

f_s = Coeficiente de rendimiento celular [--]

3.3 METODOLOGÍA

1.- Se toma una muestra del licor mixto del reactor de lodos activados y se coloca en el respirómetro.

2.- En forma inmediata se inicia la aireación en el respirómetro y se monitorea el Oxígeno Disuelto. Cuando la lectura de oxígeno disuelto (C_o) se encuentra estable se inician los ensayos respirométricos.

3.- Cuando la concentración de oxígeno disuelto llega a un punto estable (a ésta concentración se le denomina concentración de oxígeno de línea base: C_{ob}) se inicia el primer experimento el cual consiste en estimar $K_L a$.

4.- Para estimar $K_L a$ se utiliza el Método Dinámico desarrollado por Wise (Wise en Moo-Young, 1980). En éste Método se suspende la aireación en el respirómetro, esto origina una caída en la concentración de oxígeno disuelto, después la aireación es reiniciada nuevamente y la concentración de oxígeno disuelto aumenta hasta llegar al valor de C_{ob} nuevamente. La Figura 3.1 muestra los datos experimentales de oxígeno disuelto obtenidos por Tejero Gómez (2007) en un respirómetro con un volumen V_L de 7 Litros de la Planta "Centenario".

La primera fase del experimento (interrupción de la aireación) se puede describir matemáticamente como:

$$\frac{dC_o}{dt} = -Q_{O_2} X \quad (3.1)$$



Al integrarse la ecuación (3.1) se obtiene:

$$C_o = - Q_{O_2} X t + C \quad (3.2)$$

Donde C es una constante de integración. Donde en la primera fase del experimento se tiene una caída lineal, los datos experimentales se pueden ajustar a la ecuación (3.2) para estimar el valor de la pendiente $Q_{O_2} X$. La Figura (3.2) muestra el ajuste lineal (línea sólida) a los datos experimentales de la primera fase de la Figura (3.1)

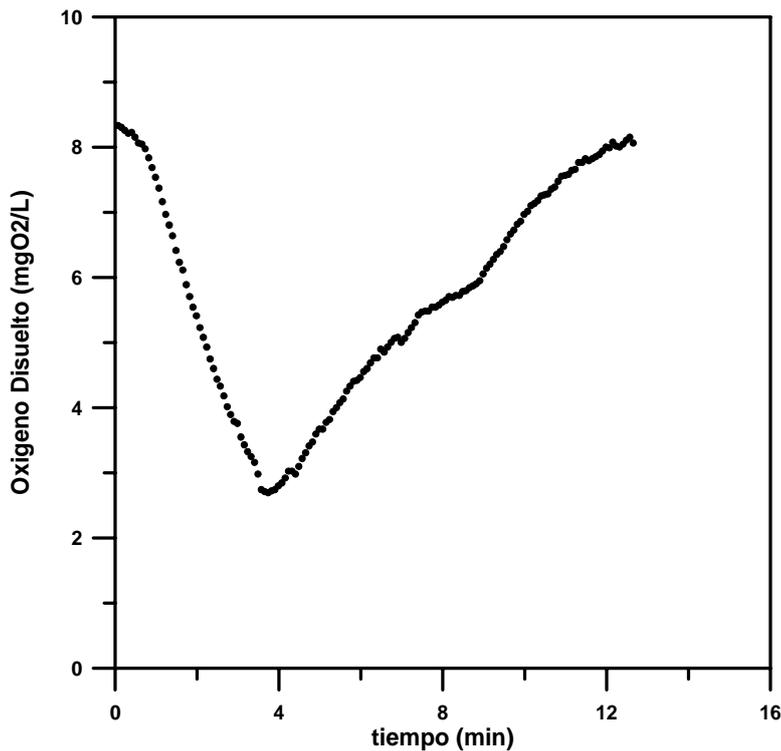


Figura 3.1.- Datos de Oxígeno Disuelto experimentales correspondientes a un experimento para estimar $K_L a$.

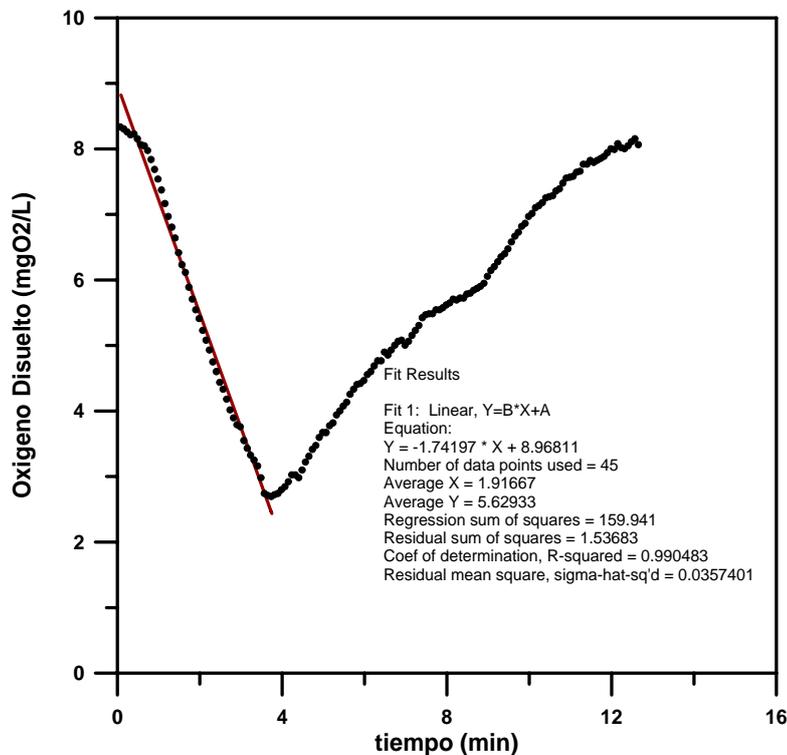


Figura 3.2.- Ajuste lineal a la primera fase del experimento.

5.- Del ajuste se obtiene el valor de QO_2X de $1.74 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ min}^{-1}$. En la segunda fase del experimento (aireación reiniciada) el proceso en el respirómetro se define mediante:

$$\frac{dC_o}{dt} = k_a a (C_{ob} - C_o) - Q_{O_2} X \quad (3.3)$$

6.- Mediante la ecuación (3.3) se realiza un ajuste a los datos de oxígeno disuelto de la segunda fase del experimento. La Figura (3.3) presenta el ajuste a los datos de la segunda fase del experimento de la Figura (3.1)

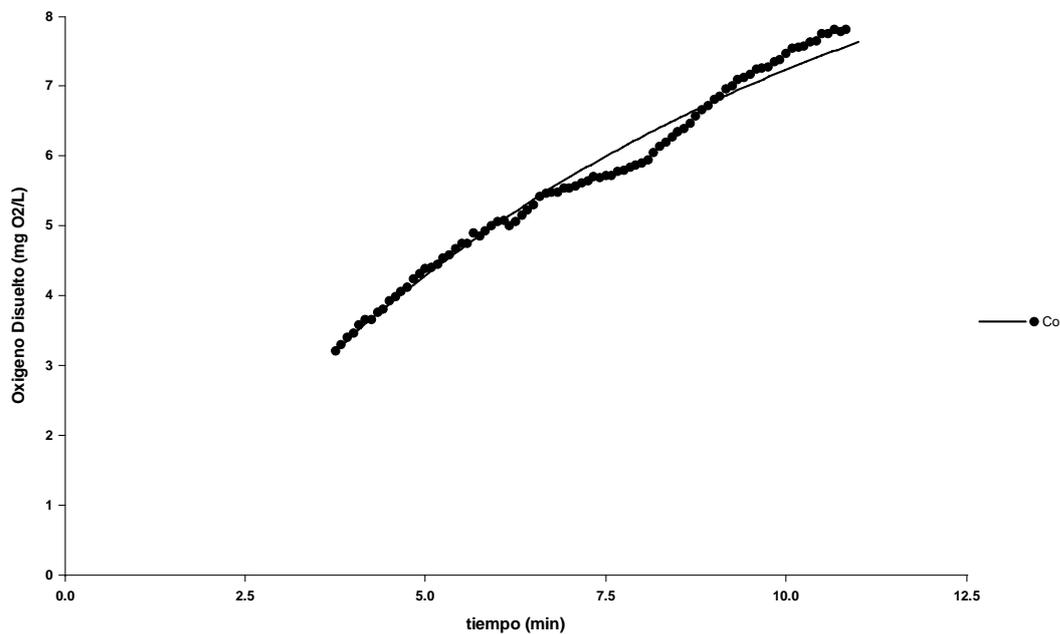


Figura 3.3.- Ajuste (línea sólida) a los datos de oxígeno disuelto mediante

El valor de $K_L a$ obtenido mediante el ajuste es de 0.13 min^{-1} ($r^2 = 0.9812$).

7.- Una vez obtenido el valor de $K_L a$ se adiciona un pulso de sustrato al respirómetro y se mantiene la aireación durante el ensayo respirométrico. La Figura (3.4) muestra un ejemplo de un respirograma obtenido mediante la adición de un pulso de $2.7 \text{ mg DQO L}^{-1}$ al respirómetro. Se puede observar que la adición de sustrato aumenta le velocidad de respiración de la biomasa lo que origina una disminución del oxígeno disuelto en el respirómetro, cuando todo el sustrato es consumido el oxígeno disuelto regresa nuevamente al valor C_{ob} .

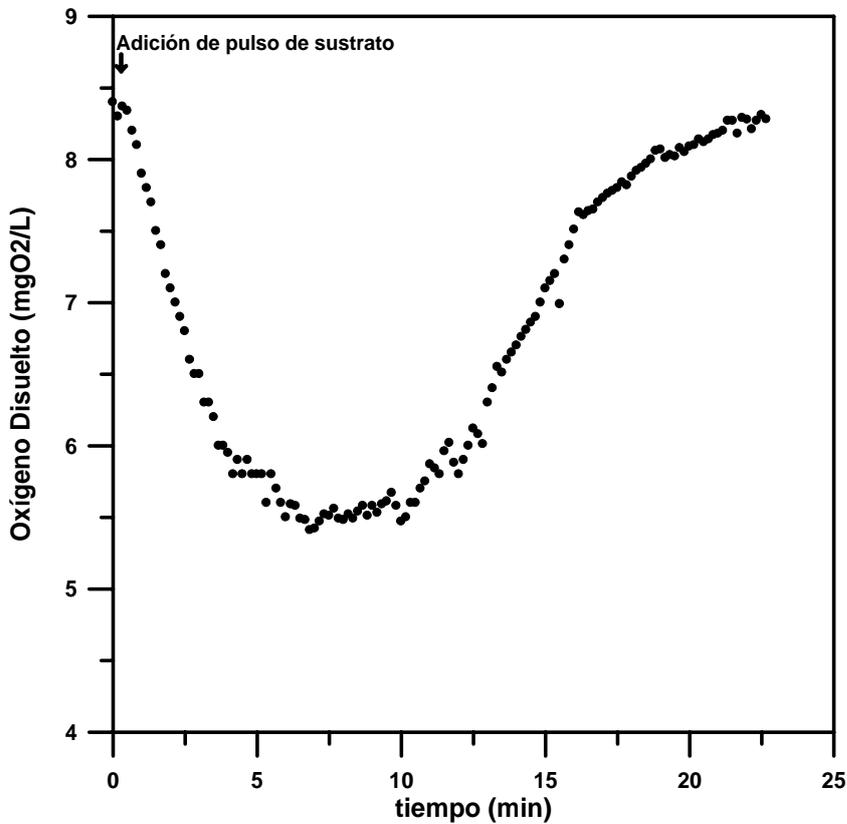


Figura 3.4.- Perfil de oxígeno disuelto generado por la adición de un pulso de sustrato orgánico.

8.- Con los datos de la Figura (3.4) se genera el perfil QO_2X_{exo} experimental mediante la siguiente ecuación:

$$QO_2X_{exo} = K_L a (C_{ob} - C_o) - \frac{dC_o}{dt} \quad (3.4)$$

9.- El perfil QO_2X_{exo} experimental es ajustado mediante las siguientes ecuaciones:



$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{f_s} \mu_{\max} \left(1 - \exp^{-\frac{t}{th}}\right) \frac{S}{K_s + S} X \quad (3.5)$$

$$QO_2 X_{exo} = \frac{1 - f_s}{f_s} \mu_{\max} \left(1 - \exp^{-\frac{t}{th}}\right) \frac{S}{K_s + S} X \quad (3.6)$$

Donde th es el tiempo de respuesta biológico a la adición del sustrato descrito por Vanrolleghem (Vanrolleghem y col., 2005). Los datos experimentales son ajustados a las ecuaciones (3.5) y (3.6) con el objetivo de estimar th , μ_{\max} y K_s . La Figura (3.5) muestra el ajuste (línea sólida) realizado al perfil experimental $QO_2 X_{exo}$ generado a partir de los datos experimentales de oxígeno disuelto. A partir de éste ajuste realizado con el programa Model Maker se obtuvieron valores de 2.15 min. para th , de 16.45 mg DQO L⁻¹ para K_s y de 0.09 h⁻¹ para μ_{\max} , con una r^2 de 0.9657.

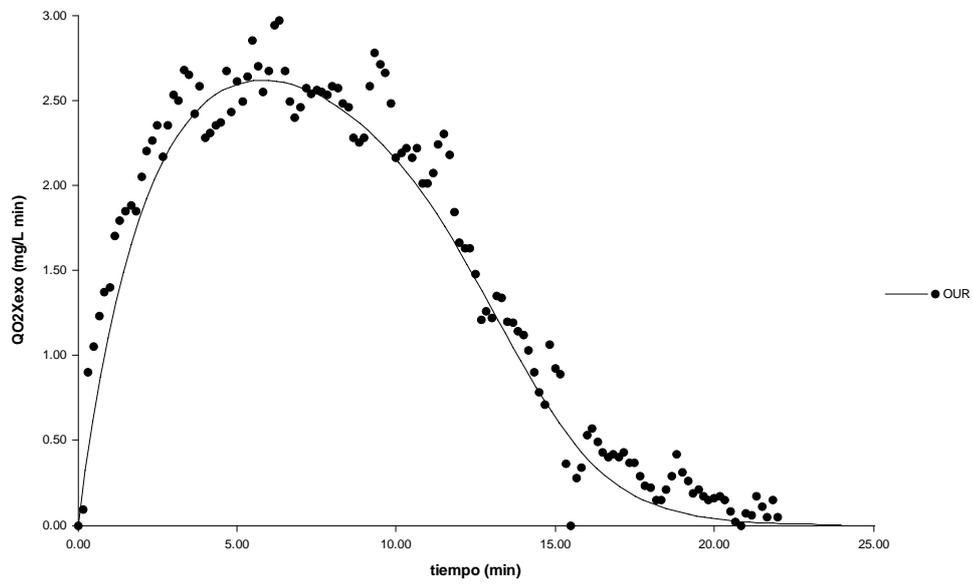


Figura 3.5.- Ajuste de los datos experimentales de QO_2X_{exo} .



CAPÍTULO 4

4.1 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DESCRITOS Y MODELACIÓN DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS

4.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MÉTODOS DESCRITOS

En éste trabajo de monografía se describieron tres métodos empleados en la estimación de parámetros cinéticos y estequiométricos del proceso de lodos activados. El Método de reactor de flujo continuo sin recirculación (MRFCSR) presenta la gran desventaja comparado con respecto al Método Extant y de Pulsos del tiempo requerido para la estimación de los parámetros, el cual es de varios días, Mientras que en los Métodos respirométricos Extant y de Pulsos es posible la estimación en el mismo día. En adición el MRFCSR requiere la medición continua de las variables DQO y SST. En cuanto al Método Extant su gran ventaja sobre el Método de Pulsos y el MRFCSR es su sencillez, rapidez y precisión donde los perfiles generados de oxígeno disuelto no suelen contener mucho ruido en comparación con los perfiles de QO_2X_{exo} del Método de Pulsos. Además de que en el Método de Pulsos el hecho de generar el perfil QO_2X_{exo} conlleva una propagación de error originada por la estimación de $K_L a$. Su única desventaja es que en ciudades localizadas a una altura elevada sobre el nivel de mar, suele ser necesario utilizar oxígeno puro, con el fin de que el oxígeno no se vuelva limitante del proceso de consumo de sustrato durante el ensayo respirométrico. Por lo mencionado anteriormente el Método Extant se presenta como un Método potencialmente adecuado para la estimación de parámetros cinéticos y estequiométricos del proceso de lodos activados.



CAPÍTULO 5

5.1 MODELACIÓN DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS CON SUPERPRODESIGNER

En éste Capítulo se describe la modelación del proceso de lodos activados mediante el programa SuperProDesigner (Intelligen Inc., USA). La Figura (4.1) muestra el diagrama generado mediante el programa de la “Planta Centenario” ubicada en Chetumal.

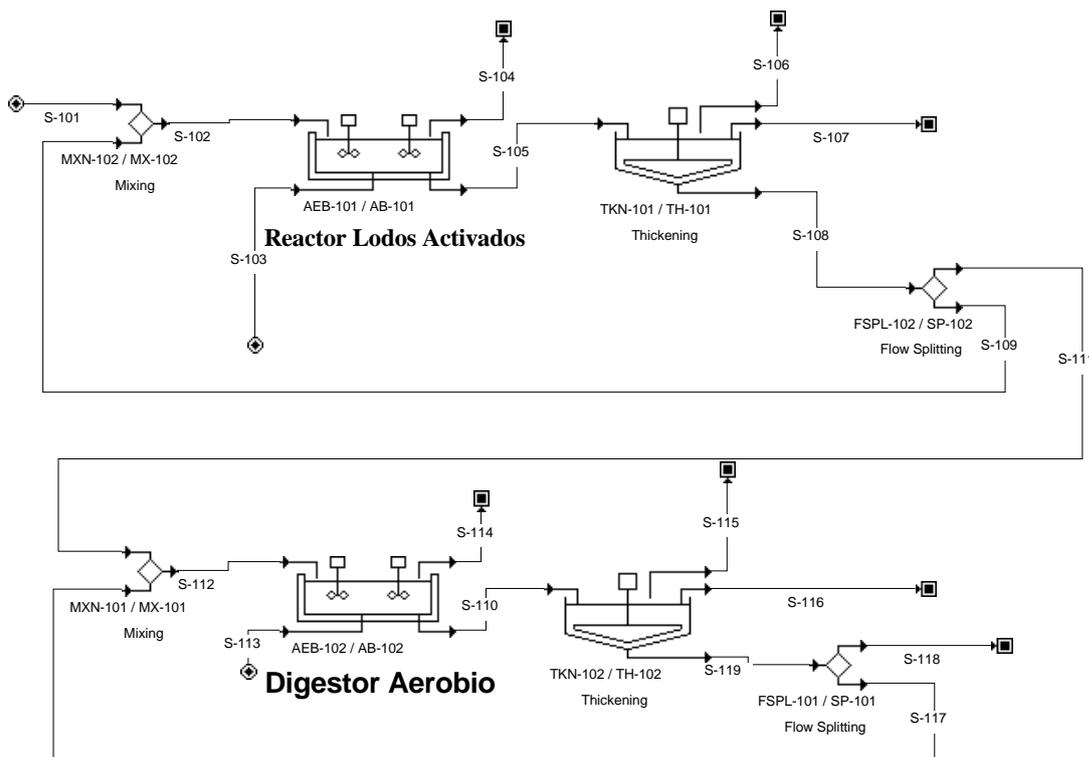


Figura 4.1 Diagrama de proceso de la Planta Centenario.

Los datos de entrada suministrados al programa son:

Corriente S-101

StreamName = S-101Temp = 25.00 degC



Press = 1.01 bar

Component	Mass Flow (kg/hr)	Mass %	Concentration (g/L)
Amonio	5.00000	0.001	0.01157
Bicarbonato	5.00000	0.001	0.01157
Biomass	50.00000	0.01	0.1155
Sustrato	110.00000	0.03	0.24459
Water	431897.00000	99.96	999.6124

Es decir se considera un agua residual con una concentración de 244.59 mg L⁻¹ de sustrato orgánico y un caudal de 432000 L h⁻¹, donde el caudal de diseño de la planta Centenario es de 120 L s⁻¹. En la Figura (4.2) se muestra la ventana correspondiente a las opciones de las condiciones de operación del reactor de lodos activados. Aquí se debe suministrar al programa el tiempo de residencia hidráulico que en este caso específico es de 10 horas. La concentración de oxígeno disuelto al reactor (default 2 mg/L) y seleccionar si la aireación al reactor es por difusor o por aireación mecánica. Se debe especificar la corriente donde se desechan los lodos (S-111) como se puede observar en la Figura (4.1). El programa calculará la potencia suministrada al reactor y el tiempo de residencia del lodo o también conocido como edad de lodo o tiempo de residencia de sólidos. La Figura (4.3) muestra las opciones para definir la cinética de degradación de sustrato aquí es necesario suministrar el valor de K el cual como se definió anteriormente es igual a μ_{max} entre Y . como se puede observar el valor suministrado en éste caso es de 0.16 h⁻¹. También es necesario suministrar el valor de K_s que en éste caso es de 35 mg L⁻¹. El programa presenta varias ecuaciones de consumo de sustrato para modelar la cinética de degradación de sustrato, en éste ejemplo se seleccionó el modelo de Monod.



Figura (4.2) ventana correspondiente a las opciones de condiciones de operación del reactor de lodos activados.

Figura 4.3.- Ventana correspondiente a las opciones de la cinética de degradación del sustrato en el reactor de lodos activados.



Cuando se ejecuta el programa los valores calculados en la corriente de salida del reactor de lodos activados (S-105) son:

STREAM NAME	S-101	S-102	S-105	S-107	S-108
SOURCE	INPUT	MXN-102	AEB-101	TKN-101	TKN-101
DESTINATION	MXN-102	AEB-101	TKN-101	OUTPUT	FSPL-102

COMPONENT FLOWRATES (kg/h averaged)

Amonio	5.00	5.47	3.0305	2.5920	0.5138
Bicarbonato	5.00	5.00	0.00	0.00	0.00
Biomass	50.0000	991.32	1067.56	42.63	1023.18
Carb. Dioxide	0.00	0.0014	0.0095	0.0077	0.0015
Sustrato	110.00	110.14	0.95	0.78	0.15
Water	431897.00	509443.09	509488.57	425251.99	84289.23

TOTAL (kg/h) 432067.0000 510555.0400 510560.1342 425298.0136
85313.0870

TOTAL (m3/h) 432.0646 510.5086 510.5146 425.3003 85.2652

Output S-105:

Sustrate Concentration: 1.9 mg/L

Biomass Concentration: 2091 mg/L

Sluge Residence Time: 130.42 h

Reactor Volume calculated: 6005.97 m³



De aquí se observa que el volumen de reactor de lodos activados que calcula el programa es de 6005 m^3 , el tiempo de residencia de sólidos que estima el programa es de 130.42 horas y el programa modela una concentración de efluente de 1.9 mg L^{-1} con una producción de biomasa de 2091 mg L^{-1} . De aquí se hace evidente la importancia de la estimación de parámetros cinéticos y estequiométricos del proceso de lodos activados, ya que estos parámetros posibilitan la simulación y la posterior optimización del proceso.



BIBLIOGRAFIA

Comisión Nacional del Agua. Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento en México. Septiembre. 1994

Eckenfelder, W.W., Ford, D.L., Water Pollution Control Experimental Procedures for Process Design. Jenkins Publishing. Co. 1970. E.U. pp. 17-22.

Gearney A. K., Petersen B., Ottoy J. P. y Vanrolleghem P. (2001) Activated sludge monitoring with combined respirometric- tritometric measurements. *Wat. Res.***35** (5), 1280-1294

Ganczarczyk, Jerzy. Activated Sludge Process Theory and Practice. Ed Marcel Dekker Inc. 1983. E.U. pp. 50-66

Grady, C. P. L. Jr., G. Aichinger, S. F. Copper y M. Naziruddin (1999) Biodegradation kinetics for selected toxic/hazardous organic compounds. Air and waste management association, Pittsburgh, PA, 141-153

Kong Z., Vanrolleghem P., Willens P. y Verstraete W. (1996) Simultaneous determination of inhibition kinetics of carbon oxidation and nitrification with a respirometer. *Wat. Res.* **30** (4), 825-836

Langergraber G., Wuchty M., Fleischmann N. and Lechner M. (2003) Rapid automated detection of nitrification kinetic using respirometry; *Wat. Sci. Tech.*, vol.**47**, 2, 149-155

López, M.V. Tratamiento Biológico de Aguas Residuales en Perspectiva de la Biotecnología en México. Ed. CONACYT. 1981. México. pp. 259-284

Shahalam, A.B., Al-Smadi, B. 1993. A Wastewater Treatment System with Optimal Control of Biomass Starvation. *J. Environ. Sci.* Vol. A28, No. 8, pp. 1751-1769



Vanrolleghem P., Gurkan sin, y Gearney K. (2004) Transient response of aerobic and anoxic activated sludge activities to sudden substrate concentration changes. *Biotech* **86** (3), 227-288

Wise citado por Moo-Yong, M. y Blanch H. (1980) Desing of biochemical engineering, ed. T. K. Chose, A. Fiechter y N. Blekebrogh. **17**, 1-69. Springer, Berlin



<http://www.geocities.com/CapeCanaveral/lab/7839/lodo.html> última visita el 28 de Septiembre de 2010

<http://www.scielo.org.pe/img/revistas/iigeo/v7n14/a10fig01g.jpg> última visita el 03 de Octubre de 2010

http://books.google.com.mx/books?id=-1NxMzYv9UC&pg=PA123&source=gbs_toc_r&cad=0_0#PPA170,M1 última visita el 09 de Octubre de 2010

<http://www.geocities.com/jdelosri/procesos.htm> última visita el 12 de Octubre de 2010

http://www.e-seia.cl/archivos/c48_20071227.165446.pdf última visita el 22 de Octubre de 2010

http://www.tecspar.org/Documentos/tecnologias_y_usos_de_aguas_residuales_en_mexico_a_escalas.pdf última visita el 28 de Octubre de 2010

<http://www.pdf-search-engine.com/lodos-activados-pdf.html> última visita el 06 de Noviembre de 2010