

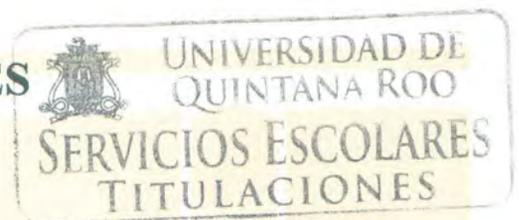


UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**ANÁLISIS DEL REACTOR DE LODOS ACTIVADOS DE
LA PLANTA “CENTENARIO” MEDIANTE
RESPIROMETRÍA EXTANT**

TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA
ERVIN JAVIER FLORES



DIRECTOR
DR. JOSÉ MANUEL CARRIÓN JIMÉNEZ

ASESORES
Q.F.B. JOSÉ LUIS GONZÁLEZ BUCIO
DR. JOEL OMAR YAM GAMBOA
M.C. JOSÉ MARTÍN RIVERO RODRÍGUEZ
DR. VÍCTOR HUGO DELGADO BLAS



Chetumal Quintana Roo, México, Julio de 2014



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**TRABAJO DE TESIS BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ
DEL PROGRAMA DE LICENCIATURA Y APROBADA COMO
REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:**

INGENIERO AMBIENTAL

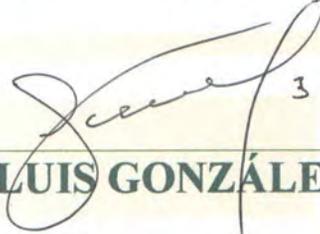
COMITÉ DE TESIS



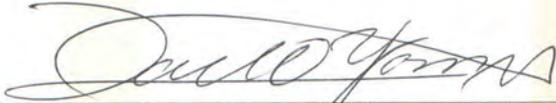
DIRECTOR:

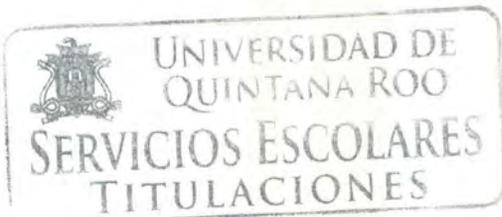

DR. JOSÉ MANUEL CARRIÓN JIMÉNEZ

SUPERVISOR:


Q.F.B. JOSÉ LUIS GONZÁLEZ BUCIO

SUPERVISOR:


DR. JOEL OMAR YAM GAMBOA



Chetumal, Quintana Roo, México, Julio de 2014.

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

Dedico este trabajo a toda mi familia, actual y extendida. Muchas gracias por todo sus amor, apoyo y esfuerzo a través de los años. Quiero que sepan que los amo mucho.

A mi Director de Tesis, el Dr. José Manuel Carrión Jiménez, un fuerte agradecimiento por su paciencia, tiempo, guía y gran conocimiento del tema; pero más que nada, gracias por su amistad. Espero quedemos en contacto por muchos años más, tanto en lo profesional y como gran amigos.

A mis asesores, Q.F.B. José Luis González Bucio, Dr. Joel Omar Yam Gamboa, M.C. José Martín Rivero Rodríguez, y Dr. Víctor Hugo Delgado Blas, gracias por aceptar formar parte de mi Comité de Tesis, y por compartir sus conocimientos a lo largo de la carrera. Estoy muy orgulloso de haber sido sus alumno y mucho más afortunado de haberlos conocido.

A mis amigos universitarios, en especial los de la generación 2009 de la carrera de Ingeniería Ambiental, gracias por las amistades y experiencias vividas. La verdad que fueron cinco años que jamás olvidaré y espero quedemos en contacto.

Al resto de la academia de Ingeniería Ambiental: M.I.A. Juan Carlos Ávila Reveles, Dr. José Alfonzo Canché Uuh, Ing. José Luis Guevara Franco, y Biól. Laura Patricia Flores Castillo, gracias por su tiempo y paciencia, dentro y fuera del salón.

A la Secretaría de Relaciones Exteriores de México, gracias por haberme otorgado la beca para asistir la Universidad de Quintana Roo, y a la División de Ciencias e Ingeniería, gracias por el apoyo económico para poder realizar este trabajo de tesis. Igualmente, gracias al Dr. Alberto Ordaz Cortes por habernos prestado el medidor de oxígeno disuelto, Hanna®, lo cual fue esencial para realizar la parte respirométrica de este trabajo.

Por último, para la chica quien siempre está a mi lado, Nina, gracias por apoyarme y enseñarme que sí hay cosas hermosas en la vida. Eres muy especial y este trabajo también te lo dedico a ti.

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figuras

FIGURA 1-1. ESQUEMA DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DE LA PLANTA CENTENARIO.....	2
FIGURA 1-2. PLANO DE DISTRIBUCIÓN DE DIFUSORES DE POROSIDAD FINA EN EL FONDO DEL REACTOR	3
FIGURA 2-1. ILUSTRACIÓN DEL ARREGLO EXPERIMENTAL DEL MÉTODO RESPIROMÉTRICO EXTANT.....	6
FIGURA 2-2. BALANCE DE MATERIA DEL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS DE LA PLANTA CENTENARIO	13
FIGURA 3-1. CONCENTRACIONES DE MATERIA ORGÁNICA SOLUBLE EN LA ENTRADA Y SALIDA DEL REACTOR DE LODOS ACTIVADOS DE LA PLANTA CENTENARIO MEDIDAS EL DÍA 27 DE FEBRERO DE 2014	17
FIGURA 3-2. CONCENTRACIONES DE MATERIA ORGÁNICA SOLUBLE EN LA ENTRADA Y SALIDA DEL REACTOR DE LODOS ACTIVADOS DE LA PLANTA CENTENARIO MEDIDAS EL DÍA 5 DE MARZO DE 2014	18
FIGURA 3-3. PULSOS CENTENARIO 5 MARZO 2014 PRUEBA 3 A 1.0 ML DE ACETATO.....	20
FIGURA 3-4. PREDICCIONES DEL <i>ASM – 1</i> DE MATERIA ORGÁNICA SOLUBLE EN EL REACTOR DE LA PLANTA CENTENARIO	25
FIGURA 3-5. PREDICCIONES DEL <i>ASM – 1</i> PARA EL ANÁLISIS REALIZADO EL 27 DE FEBRERO BAJO LA CONDICIÓN DE OPERACIÓN 3	26
FIGURA 3-6. PREDICCIONES DEL <i>ASM – 1</i> CON OXÍGENO COMO SUSTRATO LIMITANTE DEL PROCESO	27
FIGURA 3-7. VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO (<i>SOTR</i>) ESTIMADA MEDIANTE EL <i>ASM – 1</i> ..	28

Tablas

TABLA 1-1. VALORES TÍPICOS DE PARÁMETROS CINÉTICOS PARA LOS PROCESOS DE LODOS ACTIVADOS PARA AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES	4
TABLA 3-1. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES	19
TABLA 3-2. VALORES UTILIZADOS PARA LA ESTIMACIÓN DE P_X , R_O , $SOTR$, Q_A Y P_W	21
TABLA 3-3. PARÁMETROS ESTIMADOS EN EL REACTOR DE LODOS ACTIVADOS DE LA PLANTA CENTENARIO	23
TABLA 3-4. VALORES UTILIZADOS EN EL <i>ASM – 1</i>	24
TABLA 3-5. R_O , $SOTR$ Y P_W NECESARIA ESTIMADA PARA EL REACTOR DE LA PLANTA CENTENARIO	28
TABLA 3-6. RELACIÓN ENTRE <i>IVL</i> Y CARACTERÍSTICAS DE SEDIMENTACIÓN DE LODOS.....	29
TABLA 3-7. VALORES DEL <i>IVL</i> DETERMINADOS EN EL SEDIMENTADOR SECUNDARIO DE LA PLANTA CENTENARIO	29

CONTENIDO

Agradecimientos y Dedicatoria	i
Índice de Figuras y Tablas	ii
Contenido	iii
Capítulo 1.....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Objetivos.....	5
1.1.1 General	5
1.1.2 Particulares	5
Capítulo 2.....	6
2. Materiales y Métodos	6
2.1 Arreglo Experimental	6
2.2 Determinaciones Analíticas	6
2.3 Estimación de Parámetros Cinéticos por el Método Extant	7
2.4 Cálculo de la Producción de Lodos	9
2.5 Cálculo del Requerimiento de Oxígeno	9
2.6 Cálculo de <i>SOTR</i>	10
2.7 Cálculo de Flujo de Aire Requerido	11
2.8 Cálculo de la Potencia del Soplador	11
2.9 Determinación de <i>IVL</i>	12
2.10 Modelo del Sistema de Lodos Activados en Estado Transitorio	12
2.11 Calculo del Tiempo de Retención de Sólidos	15
2.12 Calculo de la Velocidad de Carga de Sólidos.....	15

Capítulo 3.....	16
3. Resultados y Discusión	16
3.1 Análisis de Remoción de <i>DQO</i> del Sistema de Lodos Activados	16
3.2 Estimación de Parámetros Cinéticos por Respirimetría Extant	19
3.3 Estimación de la Producción de Lodos, Requerimientos de Oxígeno, Flujo de Aire, <i>SOTR</i> y Potencia del Soplador.....	20
3.4 Análisis del Sistema Mediante el <i>ASM – 1</i>	23
3.5 Análisis del Sedimentador Secundario	29
3.6 Conclusiones	30
 Bibliografía.....	 31

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Quizás el recurso más afectado por la ignorancia del hombre es el agua. Toda comunidad depende de este valioso recurso como la base de su desarrollo y su supervivencia, sin embargo, hoy en día los humanos nos encontramos en una crisis de agua.

Los patrones del cambio climático están amenazando nuestros lagos y ríos, y nuestras fuentes primarias de abastecimiento de agua se están secando o se están contaminando (Environmental Protection Agency, 1994). Un ejemplo es la contaminación de aguas residuales. Se considera agua residual a los líquidos que han sido utilizados en las actividades diarias de una ciudad (Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana, 2007). Estas actividades incluyen el uso del agua en el hogar (cocina y baño), la ganadería, la agricultura, las industrias, las actividades mineras, etc.

La contaminación acuática por medio de aguas residuales afecta nuestra calidad de vida y es un gran riesgo para la salud pública. Si el agua residual no es tratada, éste puede penetrar el manto freático o escurrirse hacia aguas superficiales y contaminar nuestra fuente de suministro de agua para consumo humano. Los efectos principales del consumo de estas aguas contaminadas son las enfermedades gastrointestinales por causa de gérmenes patógenos (Environmental Protection Agency, 1994).

La remoción de estos contaminantes, tales como la materia orgánica soluble y el amonio (Tebutt, 1999), se lleva a cabo en una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) por métodos fisicoquímicos y biológicos. Entre estos métodos está el Pre-tratamiento, Tratamiento Biológico de Lodos Activados (aerobio y anaerobio), Sedimentación y Desinfección (Tejero Gómez & Romero Ramírez, 2011).

Los sistemas de lodos activados aerobios (SLAA) son actualmente los sistemas más utilizados en la remoción de materia orgánica soluble en aguas residuales de tipo municipal. En este tipo de sistemas la remoción se realiza con la ayuda de

microorganismos heterótrofos los cuales metabolizan los compuestos orgánicos en un ambiente aerobio (Galvis Toro & Rivera Guerrero, 2013).

En la ciudad de Chetumal, Quintana Roo, existen dos plantas de tratamiento: la planta “Centenario” y la planta “Fovissste V Etapa”. La planta Centenario cuenta con un sistema de lodos activados aerobio para remover materia orgánica soluble (Figura 1-1); el sistema consta de dos reactores de lodos activados de 3200 m³ de volumen total cada uno y de un sedimentador secundario de tipo circular. Los reactores son aireados mediante un soplador de desplazamiento positivo y el aire es distribuido en el reactor mediante difusores de porosidad fina colocados en un arreglo uniforme en el fondo del reactor (Figura 1-2) (Uicab Herrera, 2011).

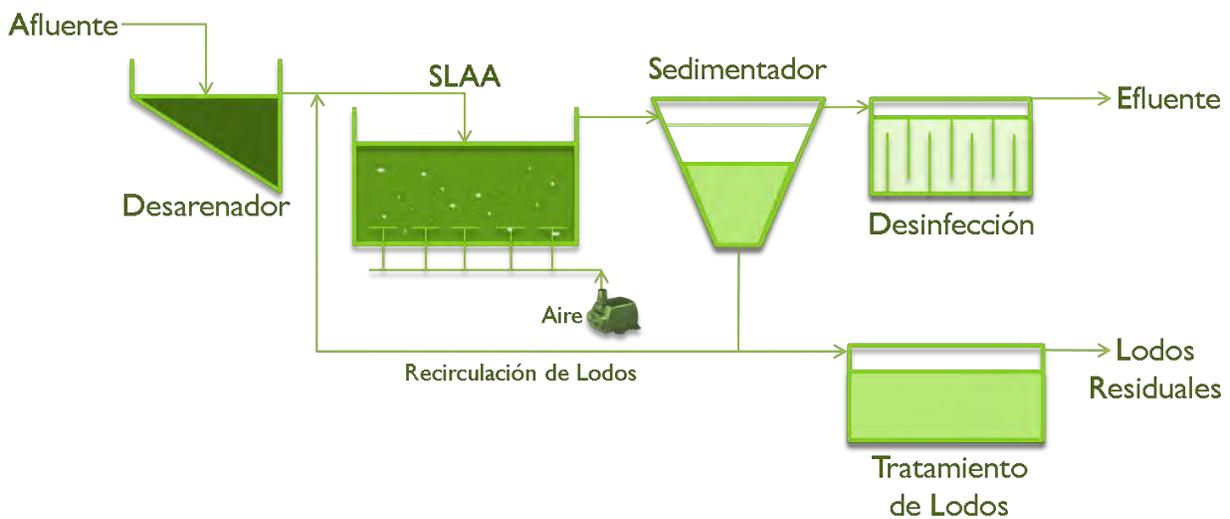


Figura 1-1. Esquema de los procesos de tratamiento de la planta Centenario.

La respirometría es un método basado en la medición del consumo de oxígeno por los microorganismos aerobios sobre un sustrato orgánico, el cual es degradado y oxidado a CO₂ (Tejero Gómez, *et al.*, 2007). El método respirométrico Extant consiste en la interrupción del suministro de oxígeno en el reactor y la cuantificación del tiempo tomado para que el consumo de oxígeno se establezca de nuevo. Estos datos son esenciales para crear un perfil de biodegradación del reactor y para estimar sus parámetros cinéticos. Dichos parámetros nos permiten evaluar, controlar y optimizar el proceso de lodos activados (Vera Gorocica, 2011).

Los parámetros cinéticos que se desean estimar son los valores de la velocidad específica de crecimiento máxima de los microorganismos, μ_{max} ; e igualmente el coeficiente de afinidad por sustrato o constante de saturación, K_s . Con estos valores podremos calcular la velocidad de producción de biomasa en el reactor de lodos activados de la planta Centenario. La Tabla 1-1 contiene los valores típicos de estos parámetros cinéticos.

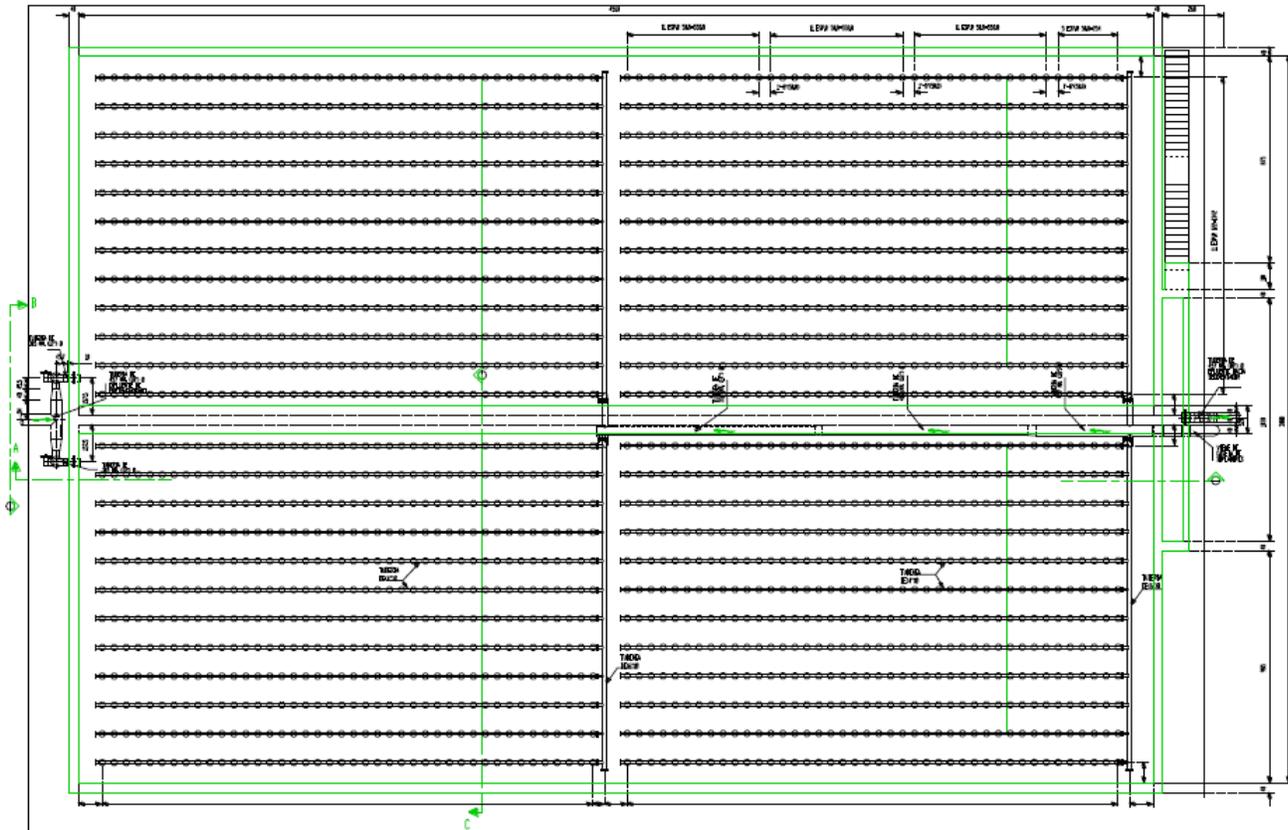


Figura 1-2. Plano de distribución de difusores de porosidad fina en el fondo del reactor (Uicab Herrera, 2011).

Tabla 1-1. Valores típicos de parámetros cinéticos para los procesos de lodos activados para aguas residuales municipales.

Coefficiente	Descripción	Unidad	Intervalo	Típico
K_s	Coeficiente de afinidad por sustrato o constante de saturación. Constante de Monod.	mg DQO L ⁻¹	15 – 70	40
f_s	Rendimiento celular (coeficiente).		0.3 – 0.6	0.4
μ_{max}	Velocidad específica de crecimiento máxima de los microorganismos.	h ⁻¹		0.41

En este trabajo realizaremos un análisis del proceso de lodos activados de la planta Centenario con el fin de optimizar su eficiencia. Mediante las ecuaciones matemáticas que modelan este proceso, se calcularán los requerimientos de oxígeno para el reactor y con base en estos resultados se calculará la potencia necesaria para suministrar el aire por los sopladores.

Todo este trabajo es con el fin de reducir el consumo energético de la planta, lo cual se pudiera extender para incluir la reducción de nuestra dependencia como humanos para los combustibles fósiles y por consecuencia la disminución de los gases invernaderos; y, el mejoramiento de la calidad del agua tratado para reducir el impacto que hemos causado a los ecosistemas. Esto es en línea con nuestro deber como alumnos de la carrera de Ingeniería Ambiental de promover un futuro sustentable para todos nosotros y nuestros hijos.

1.1 Objetivos

1.1.1 General

Analizar el reactor de lodos activados de la planta “Centenario” mediante respirometría Extant.

1.1.2 Particulares

- a.) Evaluar la eficiencia de remoción del reactor de lodos activados.
- b.) Estimar los parámetros cinéticos del reactor de lodos activados.
- c.) Calcular la producción de lodos, requerimiento de oxígeno y potencia del soplador.
- d.) Estimar los costos de aireación.

CAPÍTULO 2

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Arreglo Experimental

Para realizar los ensayos respirométricos se utilizó un respirómetro Corning® con un volumen de trabajo de 5 L de lodos de la planta Centenario (Figura 2-1). Se utilizó un agitador de velocidad variable para mantener las condiciones de mezcla completa dentro del respirómetro. Para el suministro de aire, se utilizó un aireador con un difusor poroso, colocado en la parte inferior del respirómetro. El oxígeno disuelto se midió con un medidor de oxígeno disuelto, Hanna® y sus lecturas se almacenaron en una computadora mediante un sistema de adquisición de datos conectado al medidor. Todo esto con el fin de simular las condiciones que se tienen en el reactor de lodos activados de la planta Centenario.



Figura 2-1. Ilustración del arreglo experimental del método respirométrico Extant.

2.2 Determinaciones Analíticas

Las concentraciones de biomasa en el reactor de lodos activados de la planta Centenario se midieron como Sólidos Suspendedos Totales (SST) mediante el

método de filtración descrito en *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* del APHA (American Public Health Association). Las concentraciones de amonio ($N - NH_4^+$) se determinaron por el método estándar Nessler (APHA, *et al.*, 1995), utilizando kits analíticos comerciales y un espectrofotómetro, Hach® (Hach, 1997). La concentración de materia orgánica en el agua residual se midió como Demanda Química de Oxígeno (DQO) mediante el método de Reflujo Cerrado (APHA, *et al.*, 1995), y usando el espectrofotómetro, Hach® (Hach, 1997). Las muestras se tomaron cada media hora en un lapso de tiempo de aproximadamente 8 horas, por dos días.

2.3 Estimación de Parámetros Cinéticos por el Método Extant

Los parámetros cinéticos del reactor de lodos activados de la planta Centenario se estimaron mediante el método Extant (De Bel, 1987). La metodología consistió en lo siguiente:

- a.) Se tomaron 5 L de lodos del reactor de lodos activados de la planta Centenario y se colocaron en el Respirómetro Corning® (Figura 2-1).
- b.) Cuando la concentración de oxígeno disuelto se volvió constante, se adicionaron pulsos de 1.0 mL de solución de acetato de sodio (dicha solución es fácilmente biodegradable y su f_s es similar a lo de una muestra de agua residual municipal). Al mismo tiempo, se interrumpió la aireación en el respirómetro.
- c.) Se almacenaron las lecturas de oxígeno disuelto durante el proceso de degradación de acetato de sodio en una computadora mediante un sistema de adquisición de datos conectado al medidor de oxígeno disuelto, Hanna®.

El método matemático que describe este proceso en el respirómetro es lo siguiente:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{-\mu_{max}}{f_s} \frac{S}{K_s+S} X \quad (2-1)$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu_{max} \frac{S}{K_s+S} X \quad (2-2)$$

$$\frac{dOU}{dt} = \frac{\mu_{max}}{f_S} (1 - f_S) \frac{S}{K_S + S} X \quad (2-3)$$

Donde μ_{max} es la velocidad de crecimiento específica máxima [d^{-1}], K_S es el constante de afinidad del sustrato [$mg L^{-1}$], S es la concentración de materia orgánica [$mg DQO L^{-1}$], X es la concentración de microorganismos o biomasa [$mg SST L^{-1}$, $mg DQO L^{-1}$], y f_S es el coeficiente de rendimiento celular. El f_S se calculó de la siguiente manera:

$$f_S = \frac{S_0 - OU_f}{S_0} \quad (2-4)$$

Aquí S_0 es la concentración de sustrato inicial [$mg DQO L^{-1}$] y OU_f es la cantidad de oxígeno consumido final [$mg O_2 L^{-1}$]. El oxígeno consumido durante el experimento respirómetro se calculó con los datos de oxígeno disuelto con la siguiente ecuación:

$$OU(t) = OD_0 - OD(t) \quad (2-5)$$

En esta expresión, $OU(t)$ es la cantidad de oxígeno consumido en el tiempo t [$mg O_2 L^{-1}$], OD_0 es la concentración de oxígeno disuelto inicial [$mg O_2 L^{-1}$], y $OD(t)$ es la concentración de oxígeno disuelto en el tiempo t [$mg O_2 L^{-1}$].

Los parámetros cinéticos μ_{max} y K_S fueron estimados minimizando la suma de los errores residuales al cuadrado (SERC) de los datos de oxígeno consumido con las predicciones del modelo teórico:

$$SERC = \sum_{i=1}^n [(OU_{obs})_i - (OU_{teo})_i]^2 \quad (2-6)$$

Donde OU_{obs} es el oxígeno consumido observado y OU_{teo} es el oxígeno consumido teórico de un total de n observaciones. Las ecuaciones diferenciales 2.1, 2.2 y 2.3 fueron integradas numéricamente mediante el método de Runge-Kutta y la estimación de los parámetros cinéticos se realizó con el método Marquardt con la ayuda del programa ModelMaker® (Cherwell Scientific, USA).

2.4 Cálculo de la Producción de Lodos

La producción de lodos del reactor de lodos activados de la Planta Centenario, P_X [kg SST d⁻¹] se calculó mediante (Metcalf & Eddy, 2003):

$$P_X = \frac{Q_0 \cdot f_s \cdot \frac{(S_0 - S)}{1000}}{1 + kd \cdot \theta_C} + \frac{Q_0 \cdot f_{S_n} \cdot \frac{(NO_x)}{1000}}{1 + kd_N \cdot \theta_C} \quad (2-7)$$

Donde f_s es el coeficiente de rendimiento celular, Q_0 es el caudal de alimentación [m³ d⁻¹], S_0 es la concentración de sustrato en la entrada del reactor [mg DQO L⁻¹], S es la concentración de sustrato en la salida del reactor [mg DQO L⁻¹], f_{S_n} es el rendimiento de nitrificación, NO_x es la concentración de amonio nitrificado [mg N – NH₄ d⁻¹], kd es el coeficiente de decaimiento [d⁻¹], kd_N es el coeficiente de decaimiento autótrofo [d⁻¹], y θ_C es el tiempo de retención de sólidos [d].

La concentración de amonio nitrificado, NO_x se calculó con la siguiente ecuación:

$$NO_x = NH_{4E} - NH_{4S} \quad (2-8)$$

Donde NH_{4E} es la concentración de amonio en la entrada del reactor [mg NH₄ L⁻¹], y NH_{4S} es la concentración de amonio en la salida del reactor [mg NH₄ L⁻¹].

2.5 Cálculo del Requerimiento de Oxígeno

El requerimiento de oxígeno teórico para el reactor, R_O [kg O₂ hr⁻¹] se calculó mediante (Metcalf & Eddy, 2003):

$$R_O = Q_0(S_0 - S) - 1.42 \cdot P_X + 4.33 \cdot Q_0 \cdot NO_x \quad (2-9)$$

Donde Q_0 es el caudal de entrada [m³ d⁻¹], S_0 es la concentración de sustrato en la entrada del reactor [mg DQO L⁻¹], S es la concentración de sustrato en la salida del reactor [mg DQO L⁻¹], P_X es la cantidad de lodos producidos [kg SST d⁻¹], 1.42 es el factor de conversión para DQO, y NO_x es la cantidad de nitrato que se forma [mg L⁻¹].

2.6 Cálculo de *SOTR*

La cantidad total de oxígeno requerido en un proceso de lodos activados, de modalidad aireación extendida, tomando en cuenta la oxidación del material orgánico (carbono) y nitrificación, se llama Requerimiento Real de Oxígeno Total.

Pero esta cantidad calculada, corresponde a los requerimientos de oxígeno en condiciones normales de operación, es decir: 1 atm y 20 °C. Por lo tanto, para obtener el requerimiento de oxígeno en condiciones estándar de operación, *SOTR* [kg O₂ hr⁻¹] se debe tomar el valor obtenido y llevarlo a un valor que refleje la salinidad-tensión superficial, temperatura, altura de operación, profundidad del difusor, y cantidad de oxígeno disuelto deseado para la operación. La interrelación de esos factores se describe mediante la siguiente ecuación (Metcalf & Eddy, 2003):

$$SOTR = \frac{R_O}{\left(\frac{\beta \cdot C_{S,T,H} - C_L}{C_{S,20}}\right) \cdot 1.024^{T-20} \cdot \alpha \cdot F} \quad (2-10)$$

Donde R_O es el requerimiento real de oxígeno total [kg O₂ hr⁻¹], $C_{S,20}$ es la concentración de saturación de oxígeno disuelto en agua limpia a 1 atm y 20 °C [mg L⁻¹], $C_{S,T,H}$ es la concentración media de la saturación de oxígeno disuelto en el agua limpia de un tanque de aireación a una temperatura T y una altitud H [mg L⁻¹], C_L es la concentración de oxígeno de operación [mg L⁻¹], F es el factor de obstrucción para difusores finos y muy finos, α es el factor de corrección para la transferencia de oxígeno, β es el factor de corrección de la tensión superficial-salinidad, y T es la temperatura de operación [°C].

Los factores α y β se calcularon con las siguientes ecuaciones (Metcalf & Eddy, 2003):

$$\alpha = \frac{K_L a (agua residual)}{K_L a (agua limpia)} \quad (2-11)$$

$$\beta = \frac{C_S (agua residual)}{C_S (agua limpia)} \quad (2-12)$$

La concentración media de saturación de oxígeno, $C_{\bar{S},T,H}$ se calculó mediante:

$$C_{\bar{S},T,H} = (C_{S,T,H}) \frac{1}{2} \left(\frac{P_d}{P_{atm,H}} + \frac{O_t}{21} \right) \quad (2-13)$$

Donde $C_{S,T,H}$ es la concentración de saturación de oxígeno en el agua limpia a una temperatura T y una altitud H [mg L^{-1}], P_d es la presión a la profundidad de liberación de aire [kPa], $P_{atm,H}$ es la presión atmosférica a una altura H [kPa], y O_t es el porcentaje de la concentración de oxígeno que sale del reactor, generalmente 18 a 20%.

2.7 Cálculo de Flujo de Aire Requerido

La cantidad de flujo de aire requerido por parte de los sopladores, Q_A [$\text{m}^3 \text{ aire min}^{-1}$] se calculó mediante la siguiente ecuación (Metcalf & Eddy, 2003):

$$Q_A = \frac{SOTR}{SOTE \cdot 60 \cdot \rho_{aire} \cdot 0.22} \quad (2-14)$$

Donde ρ_{aire} es la densidad del aire [kg m^{-3}], y $SOTE$ es la transferencia de eficiencia de oxígeno de difusores [mg L^{-1}].

2.8 Cálculo de la Potencia del Soplador

Para calcular el requerimiento de potencia del soplador, P_W [hp] se utilizó la siguiente ecuación (Metcalf & Eddy, 2003):

$$P_W = \frac{w \cdot R \cdot T_1}{29.7 \cdot n \cdot e} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.283} - 1 \right] \quad (2-15)$$

Donde w es el peso del flujo de aire [kg s^{-1}], R es el constante del gas [$\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$], T_1 es la temperatura absoluta de entrada [K], P_1 es la presión absoluta de entrada [atm], P_2 es la presión absoluta de salida [atm], e es la eficiencia del sistema, y n es un constante adimensional para el aire.

Como factor de conversión para calcular el costo de aireación, se consideró que 1 hp = 0.7 kW. Suponiendo un tiempo de operación de 24 horas por día y un costo de \$0.85 por kWh, se calculó un costo aproximado de \$14.27 d⁻¹ por cada 1 hp de potencia.

2.9 Determinación de *IVL*

En el sedimentador secundario, el Índice Volumétrico de Lodos, *IVL* [mL g⁻¹] se calculó de acuerdo con la metodología descrita en *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* del APHA y con la siguiente ecuación (Tchobanoglous & Crites, 2010):

$$IVL = \frac{VSL \times 1000}{SST} \quad (2-16)$$

Donde *SST* son los sólidos suspendidos totales de la muestra [mg L⁻¹], y *VSL* es el volumen sedimentado de lodo [mL L⁻¹] en una probeta de capacidad 1000 mL después de media hora.

2.10 Modelo del Sistema de Lodos Activados en Estado Transitorio

Con el propósito de realizar un análisis del funcionamiento del sistema de lodos activados de la planta Centenario, el reactor se modeló mediante el modelo *ASM – 1* (Activated Sludge Model No. 1) (International Water Association, 1991) y el sedimentador secundario fue modelado mediante un balance de materia considerando todo el sistema (Figura 2-2).

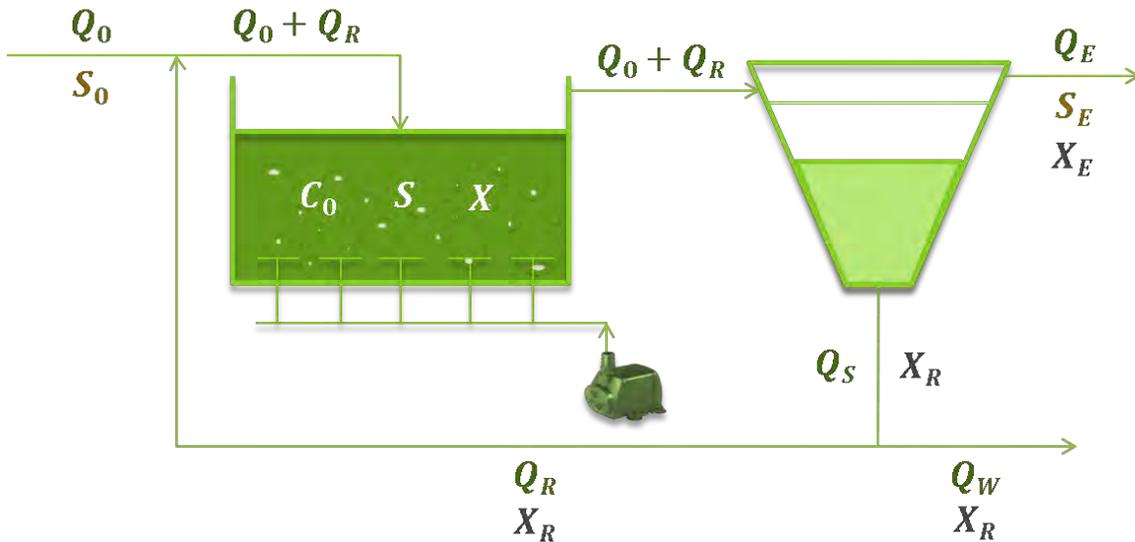


Figura 2-2. Balance de materia del sistema de lodos activados de la planta Centenario.

Las ecuaciones para consumo de sustrato, crecimiento de biomasa y consumo de oxígeno en el reactor biológico descritas en el *ASM – 1* son:

Sustrato:

$$Q_0 \cdot S_0 + Q_R \cdot S_0 = (Q_0 + Q_R)S + \frac{dS}{dt}V + r_S \cdot V \quad (2-17)$$

Biomasa:

$$Q_0 \cdot X_0 + Q_R \cdot X_R + r_X \cdot V = (Q_0 + Q_R)X + \frac{dX}{dt}V \quad (2-18)$$

Amonio:

$$Q_0 \cdot SN_0 + Q_R \cdot SN_0 = (Q_0 + Q_R)SN + \frac{dSN}{dt}V \quad (2-19)$$

Donde S es la concentración de materia orgánica [mg DQO L^{-1}], SN es la concentración de ion amonio [$\text{mg N} - \text{NH}_4^+ \text{L}^{-1}$], X es la concentración de biomasa [mg DQO L^{-1}], Q_0 es el caudal afluente [L min^{-1}], Q_R es el caudal de recirculación de lodos al reactor [L min^{-1}], V es el volumen del reactor [L], r_o es la velocidad de

consumo de oxígeno [$\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ min}^{-1}$], r_s es la velocidad de consumo de sustrato [$\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ min}^{-1}$], y r_x es la velocidad de crecimiento de biomasa [$\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ min}^{-1}$].

Los variables r_s , r_x y r_o se definen de la siguiente forma:

$$r_s = \frac{-\mu_{max}}{f_s} \frac{S}{K_S+S} X \quad (2-20)$$

$$r_x = \mu_{max} \frac{S}{K_S+S} X \quad (2-21)$$

$$r_o = \frac{\mu_{max}}{f_s} (1 - f_s) \frac{S}{K_S+S} X \quad (2-22)$$

Donde los parámetros cinéticos μ_{max} y K_S son la velocidad específica de crecimiento y la constante de saturación, respectivamente, y fueron definidas en la sección 2.3. El f_s es el rendimiento celular, también definido en la sección 2.3.

El balance de materia sobre el sedimentador secundario consiste en lo siguiente:

$$Q_S = \frac{Q_0(X - X_E)}{X_E(R - 1) + (X_R - R \cdot X)} \quad (2-23)$$

$$Q_E = Q_0 - Q_W \quad (2-24)$$

$$Q_W = (1 - R) \cdot Q_S \quad (2-25)$$

$$Q_R = R \cdot Q_S \quad (2-26)$$

Donde Q_S es el caudal de salida del sedimentador secundario [L min^{-1}], Q_0 es el caudal afluente [L min^{-1}], Q_R es el caudal de recirculación de lodos al reactor [L min^{-1}], Q_E es el caudal de efluente [L min^{-1}], Q_W es el caudal de lodos desechados [L min^{-1}], X es la concentración de biomasa [mg DQO L^{-1}], X_E es la concentración de biomasa en el efluente [mg DQO L^{-1}], X_R es la concentración de biomasa recirculada [mg DQO L^{-1}], y R es la fracción de lodos recirculadas.

2.11 Cálculo del Tiempo de Retención de Sólidos

El tiempo de retención de sólidos en el reactor, θ_C [d] se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\theta_C = \frac{V \cdot X}{Q_W \cdot X_R + Q_E \cdot X_E} \quad (2-27)$$

Donde V es el volumen del reactor [m^3], X es la concentración de biomasa en el reactor [kg m^{-3}], X_R es la concentración de biomasa recirculada al reactor [kg m^{-3}], X_E es la concentración de biomasa en el efluente del sistema [kg m^{-3}], Q_W y Q_E son los caudales de lodos desechados y de efluente del sistema respectivamente [$\text{m}^3 \text{d}^{-1}$].

2.12 Cálculo de la Velocidad de Carga de Sólidos

La velocidad de carga de sólidos al sedimentador secundario, SLR [$\text{kg d}^{-1} \text{m}^{-2}$] se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$SLR = \frac{(Q_0 + Q_R)X}{A} \quad (2-28)$$

Donde Q_0 es el caudal afluente al sistema [$\text{m}^3 \text{d}^{-1}$], Q_R es el caudal de recirculación de lodos al reactor [$\text{m}^3 \text{d}^{-1}$] y A es el área del sedimentador secundario [m^2].

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis de Remoción de DQO del Sistema de Lodos Activados

Como primera etapa de este trabajo, se realizó un análisis del funcionamiento del sistema de lodos activados y se detectaron, inicialmente, dos problemas: uno de ellos consistió en un problema de instrumentación y el otro concerniente a las condiciones de operación. Con respecto al problema de instrumentación, el sistema no cuenta con un medidor de caudal en la línea de recirculación de lodos al reactor biológico (Q_R), y el medidor de caudal afluente de la planta (Q_0) no funciona, por lo que el valor de estos parámetros, además de ser variable, es desconocido. Otro problema es que la línea de aire al reactor biológico no cuenta con un rotámetro, por lo que el flujo de aire alimentado (Q_A) al reactor biológico es desconocido también. Con respecto al segundo problema, se detectaron las siguientes condiciones de operación:

- 1) Alimentación de agua residual al sistema con recirculación de lodos
- 2) Alimentación de agua residual al sistema sin recirculación de lodos
- 3) Interrupción de la alimentación del agua residual sin recirculación de lodos (proceso en lote)
- 4) Interrupción de la alimentación del agua residual con recirculación de lodos

Estas condiciones de operación se presentaban a lo largo del día de funcionamiento de la planta. En las condiciones 3 y 4, el agua residual era descargada directamente a la sabana, ubicada en la parte posterior de la planta, sin tratamiento alguno. Las Figuras 3-1 y 3-2 presentan las variaciones horarias en la concentración de materia orgánica soluble del agua residual de entrada a la planta y de la salida del reactor de lodos activados, medidas en dos diferentes fechas. Los principales factores responsables de las variaciones de la concentración del agua residual que llega a la planta son las costumbres de los residentes de la población (las cuales producen variaciones a corto plazo), las condiciones relacionadas con las estaciones (que producen variaciones a corto y largo plazo), y las descargas diferentes al tipo municipal. Con respecto a las

variaciones en la concentración de materia orgánica a la salida del reactor, las condiciones de operación antes mencionadas influyen de tal manera que no se presentan condiciones de estado estacionario en el reactor (concentraciones de materia orgánica, biomasa y amonio constantes).

Como se puede observar en las Figuras 3-1 y 3-2, las concentraciones de DQO en la entrada del reactor presentó variaciones desde un valor inicial de 838.9 mg DQO L⁻¹ a las 0630 horas a un valor máximo a las 0800 horas de 1173 mg DQO L⁻¹ y un valor mínimo a las 1130 horas de 459.6 mg DQO L⁻¹ (Figura 3-1). Las concentraciones de materia orgánica en la salida del reactor variaron desde 32.7 hasta 758.5 mg DQO L⁻¹ (valor promedio = 249.5 mg DQO L⁻¹) (Figura 3-1).

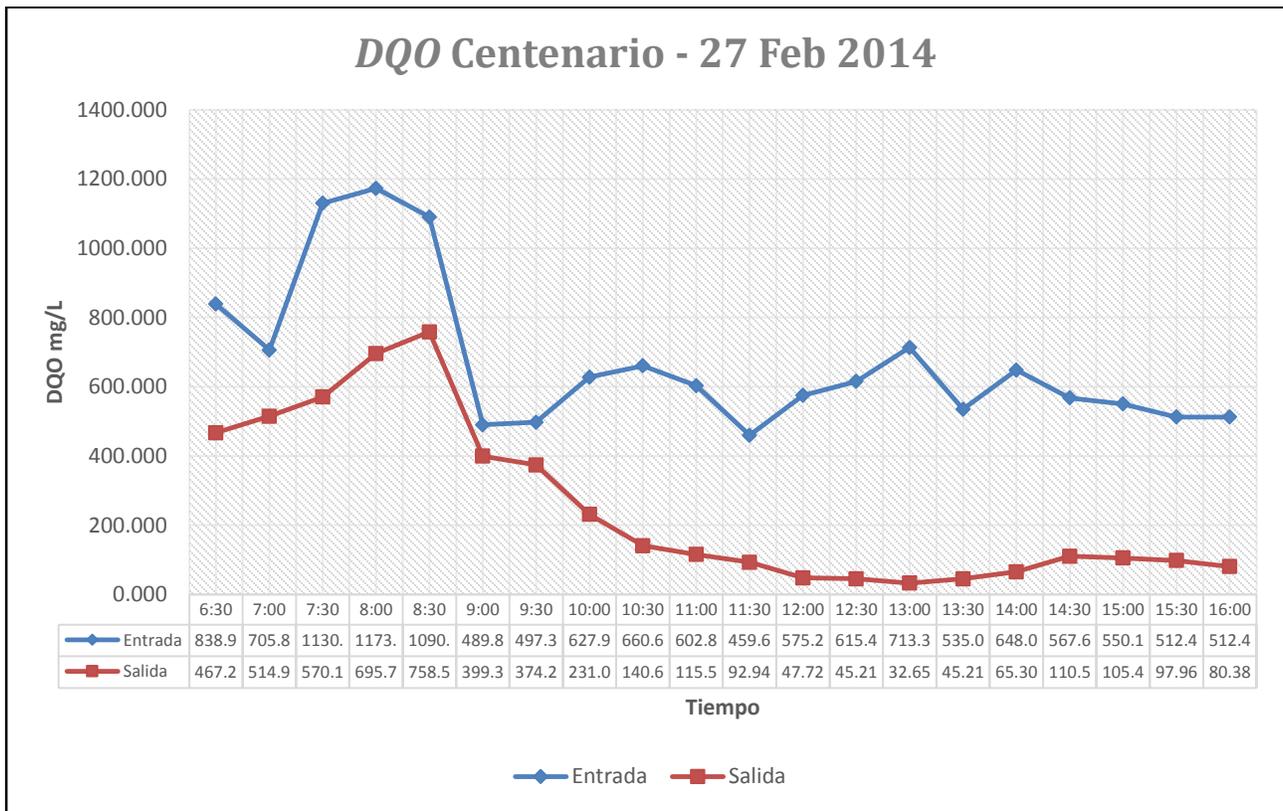


Figura 3-1. Concentraciones de materia orgánica soluble en la entrada y salida del reactor de lodos activados de la planta Centenario medidas el día 27 de febrero de 2014.

Para el análisis del 5 de marzo en la entrada del reactor, la concentración máxima se registró en la primera muestra de las 0630 horas con una concentración de

725.9 mg DQO L⁻¹ y la mínima a las 0800 horas con 331.6 mg DQO L⁻¹ (Figura 3-2). En la salida, las concentraciones variaron de 15.1 a 251.2 mg DQO L⁻¹ (valor promedio = 130.1 mg DQO L⁻¹) (Figura 3-2).

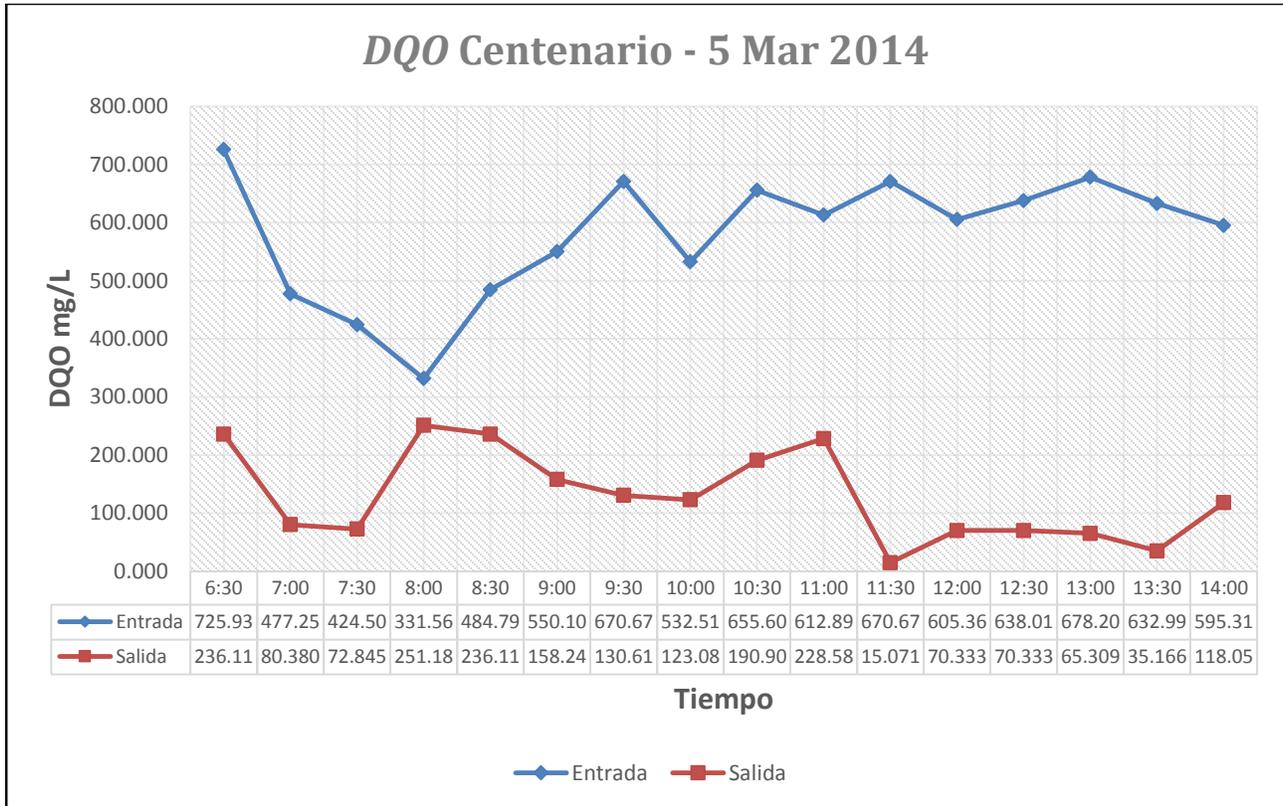


Figura 3-2. Concentraciones de materia orgánica soluble en la entrada y salida del reactor de lodos activados de la planta Centenario medidas el día 5 de marzo de 2014.

Como se mencionó anteriormente, el sistema de lodos activados es en ocasiones alimentado con el agua residual proveniente de un cárcamo cercano a la planta. Bajo esta condición de operación, el agua tratada en el sistema es enviada a desinfección con cloro y posteriormente descargada en la sabana, de acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (publicada el 24 de diciembre del 2007 en el Diario Oficial de la Federación), en donde se establece una concentración de la DQO límite máxima permisible en la descarga de aguas residuales en ríos, embalses, aguas costeras, estuarios y humedales naturales de 200 mg DQO L⁻¹ (Tabla 3-1) (Diario Oficial Federal, 2007). Para el promedio mensual, el agua tratada por el sistema excedería el límite máximo permisible.

Tabla 3-1. Límites máximos permisibles en las descargas de aguas residuales (Diario Oficial Federal, 2007).

Parámetro	Cuerpos Receptores de las Descargas		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C
	Ríos, Aguas Costeras y Suelo	Ríos, Embalses, Aguas Costeras, Estuarios y Humedales Naturales	Ríos y Embalses
SST [mg L^{-1}]	150	75	40
DQO [mg L^{-1}]	320	200	100

Además es importante mencionar que en las condiciones de operación 2 y 3, donde el agua residual es descargada sin tratamiento alguno, también se excede el límite máximo permisible, donde la concentración promedio fue de $675.3 \text{ mg DQO L}^{-1}$ para el análisis del 27 de febrero y de $580.4 \text{ mg DQO L}^{-1}$ para el análisis del 5 de marzo. La descarga del agua residual con altas concentraciones de materia orgánica, además de generar problemas de contaminación en el cuerpo de agua receptor, conlleva también problemas de multas económicas que se establecen en la ley antes mencionada.

3.2 Estimación de Parámetros Cinéticos por Respirimetría Extant

Con la finalidad de realizar un análisis detallado del proceso biológico en el sistema, se estimaron los parámetros cinéticos del reactor con el método Extant. Los experimentos fueron realizados con pulsos de sustrato de 1 y 0.5 mL de solución de acetato de sodio en el respirómetro con 5 L de lodos activados del reactor de la planta Centenario, en donde 1 mL de solución proporcionaba una concentración de $5.4 \text{ mg DQO L}^{-1}$ en el respirómetro. Cabe resaltar que la estimación de parámetros cinéticos no fue realizada en el mismo día de recolección de la muestra, ya que los experimentos deben ser realizados cuando se ha consumido por completo la materia orgánica soluble presente en la muestra de lodos activados colocada en el respirómetro; sin embargo, la muestra

recolectada contenía concentraciones elevadas de materia orgánica soluble, tal como lo demuestran los datos presentados en las Figuras 3-1 y 3-2. La Figura 3-3 presenta un respirograma obtenido de una muestra de lodos del día 27 de febrero, ajustado al modelo teórico mediante el programa ModelMaker®. Los valores promedio obtenidos para μ_{max} y K_s fueron de $0.072 \text{ h}^{-1} \pm 0.008$ y $34 \text{ mg DQO L}^{-1} \pm 9$ respectivamente.

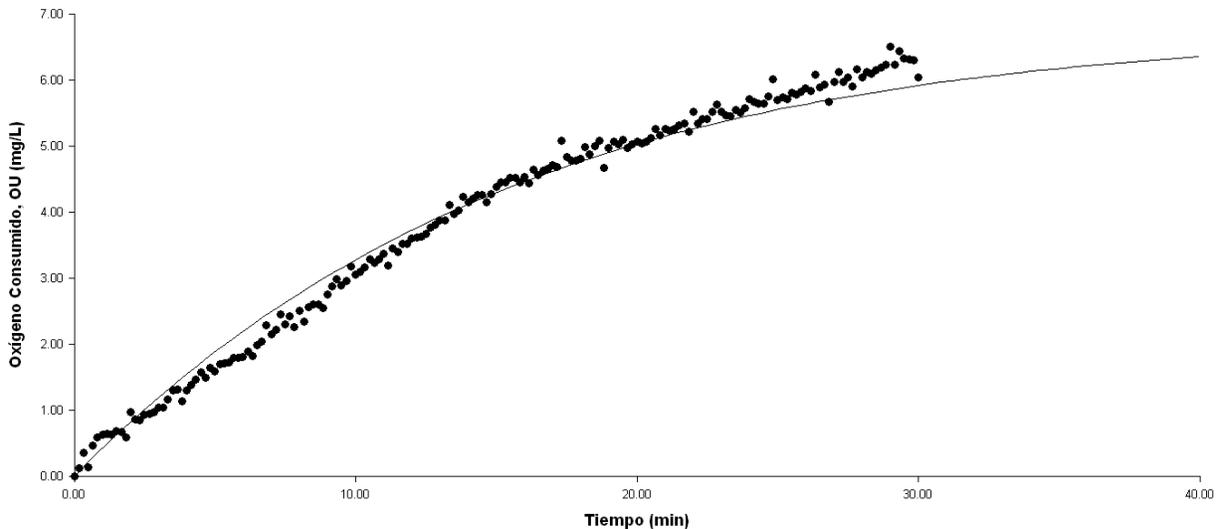


Figura 3-3. Pulsos Centenario 5 marzo 2014 Prueba 3 a 1.0 mL de Acetato.

3.3 Estimación de la Producción de Lodos, Requerimientos de Oxígeno, Flujo de Aire, SOTR y Potencia del Soplador

La producción de lodos del sistema (P_X), los requerimientos de oxígeno en el reactor (R_O), el $SOTR$, el flujo de aire requerido en el reactor (Q_A), y la potencia necesaria del soplador (P_W), se estimaron mediante las ecuaciones 2-7, 2-9, 2-10, 2-14 y 2-15 respectivamente. La Tabla 3-2 presenta los valores utilizados para la estimación de estos parámetros. Como se mencionó anteriormente, el sistema no cuenta con medidor de caudal de afluente, por lo que para las estimaciones se utilizó el caudal de diseño del sistema ($10,800 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$).

Adicionalmente, se estimó la velocidad de transferencia estándar de oxígeno al reactor de lodos activados de la planta Centenario de funcionamiento actual ($SOTR_{cen}$). Esta velocidad se estimó considerando el motor de 100 hp del soplador que alimenta aire al reactor. Con base a la potencia del motor, se calculó el flujo

de aire actual que se envía al reactor (Q_{Acen}) y con este valor, el $SOTR_{cen}$ fue estimado con el objetivo de realizar una comparación con el valor estimado con la ecuación 2.10. El flujo de aire mínimo requerido (Q_{Amin}), para asegurar un buen mezclado en el reactor, se calculó considerando un arreglo de rejilla uniforme de los difusores en el fondo del reactor como $15 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ por cada $1,000 \text{ m}^3$ de reactor (Grady, *et al.*, 1999), mientras que el flujo de aire máximo para evitar rompimiento de flóculos en el reactor (Q_{Amax}), bajo la misma consideración anterior, fue de $90 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ por cada $1,000 \text{ m}^3$ de reactor (Metcalf y Eddy, 2003).

Tabla 3-2. Valores utilizados para la estimación de P_x , R_o , $SOTR$, Q_A y P_W .

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
S	3.5	mg DQO L ⁻¹	Supuesto
S_0	700	mg DQO L ⁻¹	Éste trabajo
θ_c	6	d	Supuesto
μ_{max}	0.072	h ⁻¹	Éste trabajo
V	6,000	m ³	Planta Centenario
X	3,400	mg SST L ⁻¹	Éste trabajo
f_s	0.4		Éste trabajo
f_{s_n}	0.16		Supuesto
α	0.6		Tchobanoglous y Crites, 2010
β	0.97		Metcalf y Eddy, 2003
C_L	2.1	mg O ₂ L ⁻¹	Supuesto
CNO_3	16	mg N L ⁻¹	Éste trabajo
$C_{\bar{S},T,H}$	9.17	mg O ₂ L ⁻¹	Éste trabajo

Continuación de la Tabla 3-2:

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
η_{COM}	0.75		Metcalf y Eddy, 2003
η_{QA}	15		Metcalf y Eddy, 2003
F	0.75		Metcalf y Eddy, 2003
kd	0.055	d ⁻¹	Metcalf y Eddy, 2003
kd_N	0.04	d ⁻¹	Metcalf y Eddy, 2003
K_S	35	mg DQO L ⁻¹	Éste trabajo
P_{atm}	1	atm	
P_a	1.33	atm	
Q_0	10,800	m ³ d ⁻¹	Caudal de Diseño

La Tabla 3-3 presenta los parámetros estimados para el sistema de lodos activados. Considerando los límites calculados (90-540 m³ aire min⁻¹), el valor estimado del flujo de aire alimentado al sistema en la planta de 113.2 m³ aire min⁻¹ se sitúa dentro de estos límites. Sin embargo, dado que la planta no cuenta con un controlador de velocidad variable para el motor del soplador, este flujo es alimentado en forma constante. Como se puede observar en la Tabla 3-3, el flujo de aire necesario para el proceso estimado mediante la ecuación 2-10 es de 93.1 m³ aire min⁻¹, por lo cual el $SOTR$ es menor al $SOTR_{cen}$ mantenido en el sistema de la planta, por lo cual la potencia necesaria del soplador estimada es de 81.6 hp, la cual es menor a la potencia empleada en la planta Centenario (100 hp). Es importante recalcar que estas estimaciones fueron realizadas para un caudal de 10,800 m³ d⁻¹ y, como se mencionó anteriormente, la planta presenta el problema de no contar con un medidor de caudal que funcione de manera adecuada y un controlador de velocidad variable, lo cual es de suma importancia

en la estimación de la potencia requerida y el control de la potencia suministrada al soplador con el objetivo de optimizar costos.

Tabla 3-3. Parámetros estimados en el reactor de lodos activados de la planta Centenario.

Parámetro	Valor	Unidad	Parámetro	Valor	Unidad
Q_{Amin}	90	m ³ aire min ⁻¹	R_O	3,418	kg O ₂ d ⁻¹
Q_{Acen}	113.2	m ³ aire min ⁻¹	Q_A	93.1	m ³ aire min ⁻¹
Q_{Amax}	540	m ³ aire min ⁻¹	$SOTR$	8,588	kg O ₂ d ⁻¹
$SOTR_{cen}$	10,784	kg O ₂ d ⁻¹	P_W	76	hp

3.4 Análisis del Sistema Mediante el ASM – 1

Como se mencionó en la sección 3.1, el sistema de lodos activados presentó 4 diferentes condiciones de operación en los días de estudio del proceso. Estas variaciones transitorios hicieron imposible aplicar el programa SuperPro Designer® (Intelligen, USA), por lo cual se utilizó el ASM – 1 y un balance de materia en el sistema de lodos activados para analizar el funcionamiento bajo condiciones transitorios y bajo condiciones estacionarias del sistema. Las ecuaciones 2.17, 2.18, 2.19, 2.20, 2.21, 2.22 fueron resueltas mediante el programa ModelMaker® (Cherwell Scientific, USA). Mediante este programa se calcularon las concentraciones de materia orgánica soluble (S) y de ión amonio (SN) en el efluente del sistema, las concentraciones de biomasa heterotrofa (X) y autótrofa (X_N) del reactor, los caudales de recirculación de lodos (Q_R), de lodos desechados del sistema (Q_W) y del efluente del sistema (Q_E), además de los requerimientos de oxígeno (R_O); con base a estos datos fue posible calcular el tiempo de retención de sólidos del reactor (θ_C), el tiempo de residencia hidráulico y la velocidad de carga de sólidos al sedimentador (SLR), la $SOTR$ y el flujo de aire requerido (Q_A). La Figura 3.4 presenta la concentración de materia orgánica en el reactor y los datos usados para generar esta grafica se muestran en la Tabla 3-4. Como se puede observar en la Figura 3.4 el ASM – 1 predice una concentración estacionaria de materia orgánica en aproximadamente dos horas de funcionamiento del reactor.

Tabla 3-4. Valores utilizados en el ASM – 1.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
S_0	700	mg DQO L ⁻¹	Éste trabajo
μ_{max}	0.072	h ⁻¹	Éste trabajo
V	6,000	m ³	Planta Centenario
X_R	10,000	mg SST L ⁻¹	Éste trabajo
f_s	0.4		Éste trabajo
f_{s_n}	0.16		Supuesto
K_s	35	mg DQO L ⁻¹	Éste trabajo
K_{sO}	17	mg O ₂ L ⁻¹	Grady, 1999
Q_0	10,800	m ³ d ⁻¹	Caudal de diseño

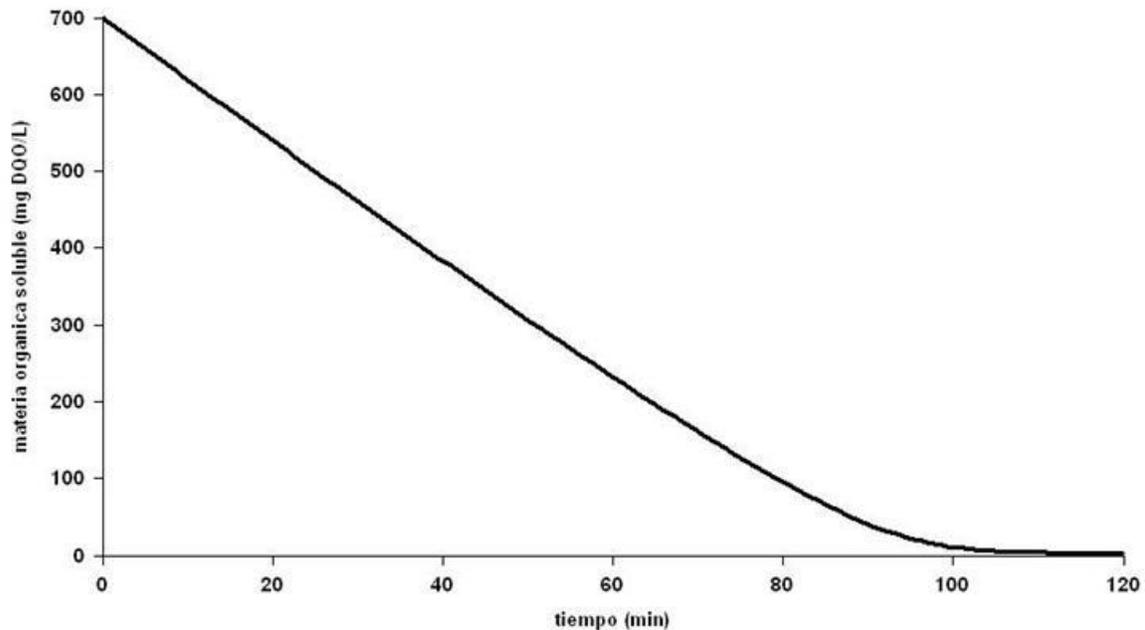


Figura 3-4. Predicciones del ASM – 1 de materia orgánica soluble en el reactor de la planta Centenario.

La Figura 3.5 presenta 8 concentraciones medidas de materia orgánica soluble en el reactor. Estas concentraciones fueron medidas durante el funcionamiento del reactor bajo la condición de operación 3 (interrupción de la alimentación del agua residual sin recirculación de lodos). La línea sólida en la Figura 3.5 corresponde a las predicciones del ASM – 1. Como se puede observar, existe una diferencia significativa entre las predicciones del ASM – 1 y las concentraciones medidas en el reactor. Esta diferencia indica que la remoción de materia orgánica en el reactor bajo estas condiciones de operación estaba limitada por el oxígeno. Cuando el oxígeno es el sustrato limitante en la remoción de materia orgánica, es necesario incorporar otro término tipo Monod en las ecuaciones 2.20, 2.21 y 2.22 de la siguiente forma (Grady, *et al.*, 1999):

$$\frac{C_o}{Ks_o + C_o}$$

Donde C_o es la concentración de oxígeno disuelto [mg L^{-1}] y Ks_o es la constante de saturación de oxígeno [$\text{mg O}_2 \text{L}^{-1}$].

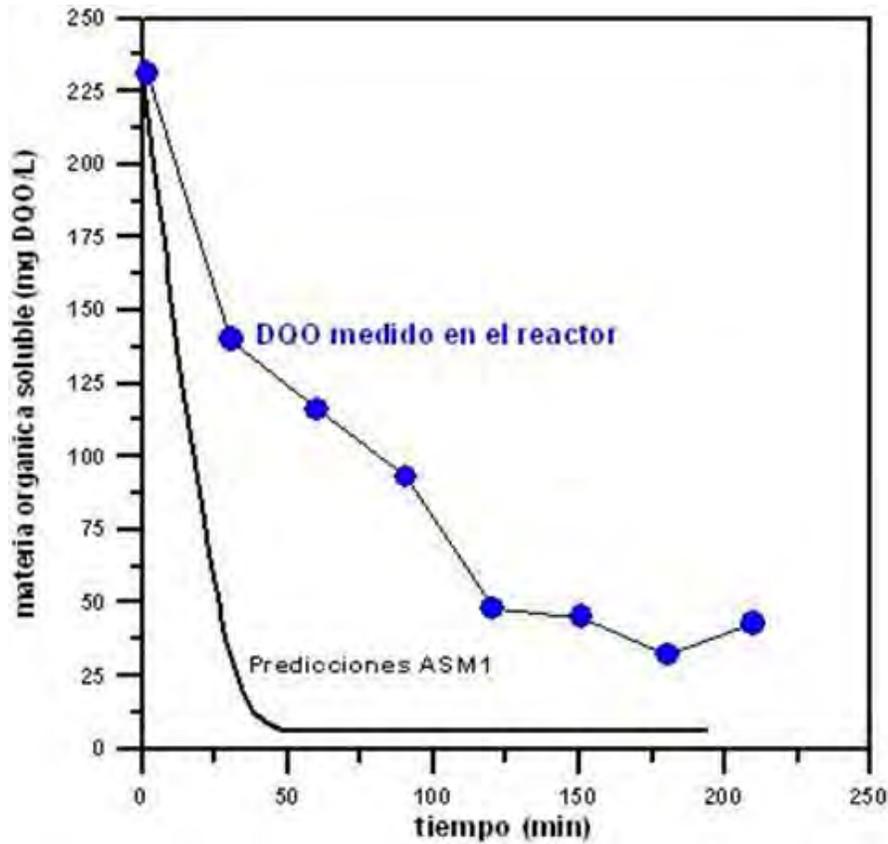


Figura 3-5. Predicciones del *ASM – 1* para el análisis realizado el 27 de febrero bajo la condición de operación 3.

La Figura 3.6 presenta las predicciones del *ASM – 1* incorporando al oxígeno como sustrato limitante del proceso de remoción. Como se puede observar las predicciones del modelo concuerdan mejor con las concentraciones medidas en el reactor, lo cual confirma que bajo esta condición de operación la remoción de materia orgánica se encuentra limitada por la transferencia de oxígeno.

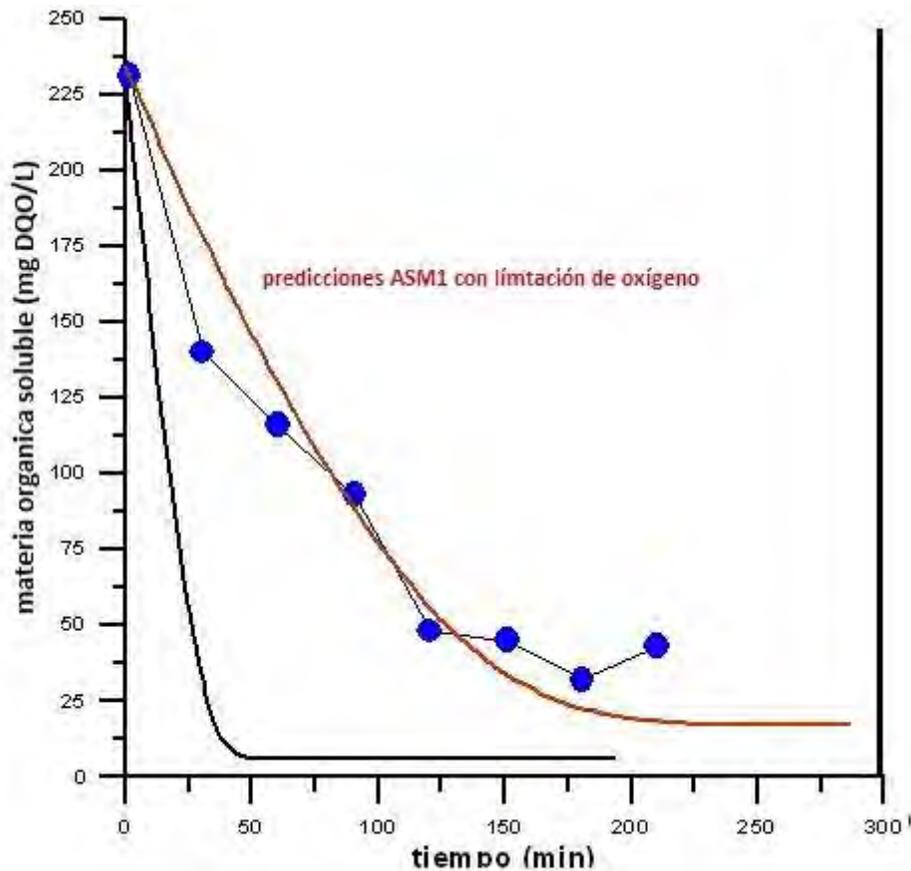


Figura 3-6. Predicciones del ASM – 1 con oxígeno como sustrato limitante del proceso.

La Figura 3.7 presenta la curva de la *SOTR* calculada mediante los datos de los requerimientos de oxígeno estimados mediante el ASM – 1. Como se puede observar en esta figura, para lograr la concentración de materia orgánica soluble estacionaria en 50 minutos predicha por el ASM – 1 sin limitación de oxígeno, se requeriría suministrar inicialmente una *SOTR* de 75,000 kg d⁻¹ e irla variando paulatinamente hasta llegar a una *SOTR* de 8,422 kg d⁻¹ en la condición de estado estacionario. Esto implicaría costos demasiado elevados para realizar el proceso en lote. La línea amarilla corresponde a la *SOTR* calculada a partir del motor de 100 hp de la planta (10,800 kg d⁻¹). Al no contar con un controlador de velocidad variable, esta *SOTR* es constante en las cuatro condiciones de proceso descritas anteriormente. La Tabla 3.5 presenta los valores de los requerimientos de oxígeno, la *SOTR* y la potencia requerida de los sopladores (estimados en la

sección 3) estimados mediante ASM – 1 y calculados a partir del motor de 100 hp de la planta Centenario.

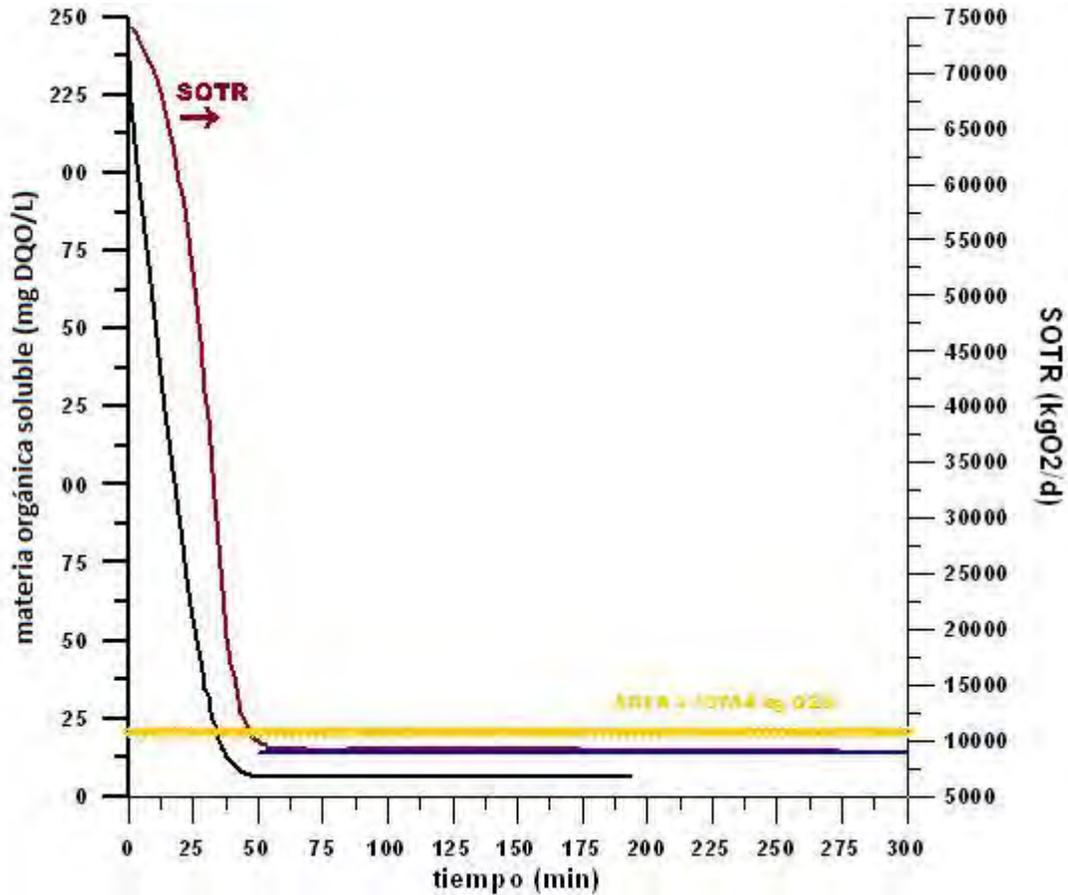


Figura 3-7. Velocidad de transferencia de oxígeno (*SOTR*) estimada mediante el ASM – 1.

Tabla 3-5. R_0 , *SOTR* y P_W necesaria estimada para el reactor de la planta Centenario.

Parámetro	Ecuaciones 2.9, 2.10 y 2.15	ASM – 1	Centenario
R_0 (kg O ₂ d ⁻¹)	3,678	4210	No calculado
<i>SOTR</i> (kg O ₂ d ⁻¹)	8,588	8791	10,784
P_W (hp)	76	81.6	100

De acuerdo con los datos mostrados en la Tabla 3.5, la potencia estimada en la sección 3.3 y la potencia estimada mediante el R_o predicho por el $ASM - 1$ son menores a la potencia de 100 hp del motor del soplador de la planta. De acuerdo con estos datos estimados, se requeriría una potencia menor para tratar $10,800 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ de agua residual en el sistema de lodos activados de la planta. Sin embargo, la falta de un controlador de velocidad variable en el motor limita a una operación con un flujo constante de aire al reactor.

3.5 Análisis del Sedimentador Secundario

Las características de sedimentación del sedimentador secundario del sistema de lodos activados de la planta Centenario se analizaron mediante el IVL . La Tabla 3.6 presenta las características de sedimentación del lodo en función del valor del IVL . La Tabla 3.7 presenta los valores del IVL determinado en tres muestreos.

Tabla 3-6. Relación entre IVL y características de sedimentación de lodos (Grady, 1999).

Rango de IVL [mL g ⁻¹]	Características de sedimentación de lodos y de compactación
<80	Excelente
80 – 150	Moderado
>150	Pobre

Tabla 3-7. Valores del IVL determinados en el sedimentador secundario de la planta Centenario.

SST [mg L ⁻¹]	Vol. Sedimentado	IVL [mL g ⁻¹]	Fecha
2800	580	207	28 febrero
3600	640	178	7 marzo
3400	835	246	8 de mayo

La velocidad de carga de sólidos al sedimentador (*SLR*) predicha por el *ASM – 1* fue de $8.1 \text{ kg SST m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. El valor de diseño máximo de *SLR* permisible para un sistema de lodos activados aerobio es de $8 \text{ kg SST m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Tchobanoglous & Crites, 2010), lo cual indica de que la planta está operando en condiciones máximas de operación.

3.6 Conclusiones

Al analizar el funcionamiento del sistema de lodos activados de la planta Centenario, se detectaron 4 condiciones de operación relacionados al alimentación de agua residual y recirculación de lodos. Esto fue un problema ya que no se presentaba la condición de estado estacionario esperada. Sin embargo, tomando los datos de diseño de la planta más los datos medidos de concentración de materia orgánica soluble, se logró modelar teóricamente el sistema de lodos activados de la planta Centenario, y se obtuvieron los parámetros cinéticos μ_{max} y K_s .

Adicionalmente, se calcularon la producción de lodos, requerimiento de oxígeno y potencia del soplador mediante las ecuaciones descritas por Metcalf & Eddy. Ya que la planta no cuenta con un medidor de caudal, se consideró el caudal de diseño de la planta para calcular la potencia del soplador. Esta potencia del soplador se calculó en 76 hp, lo cual es 24% menos a la potencia empleada en la planta (100 hp). Esto se traduce a un costo de aireación innecesario que se está consumiendo actualmente.

Con respecto al sedimentador secundario, los cálculos de *IVL* verificaron la presencia de hinchamiento de lodos en el reactor. Este problema de sedimentación se debe a las condiciones de operación previamente mencionadas, lo cual resulta a un desvío de caudal hacia la sabana adyacente, y posible contaminación en materia orgánica y amonio a ese cuerpo receptor de agua.

BIBLIOGRAFÍA

APHA, AWWA & WEF, 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th Ed.* Washington D.C.: American Public Health Association.

Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana, 2007. *CESPT: Cuido El Agua.* [Online] Available at: <http://www.cuidoelagua.org> [Accessed 21 abril 2013].

Diario Oficial Federal, 2007. *Ley Federal de Derechos en Materia de Agua.* Mexico D.F.: Diario Oficial de la Federación.

Environmental Protection Agency, 1994. *The Quality of our Nation's Water.* Washington D.C.: EPA.

Galvis Toro, J. & Rivera Guerrero, X., 2013. *Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos presentes en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) de la empresa Jugos Hit de la ciudad de Pereira.* Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.

Grady, C. P. L. J., Daigger, G. T. & Lim, H. C., 1999. *Biological Wastewater Treatment.* 2nd ed. New York: Marcel Dekker, Inc..

Hach, 1997. *Water Analysis Handbook. ISO 9001 Certified. 3rd Ed.* Loveland, Colorado: Hach Company.

Metcalf & Eddy, 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse.* New York: McGraw-Hill Education.

Mogens, H., Gujer, W., Mino, T. & Van Loosdrecht, M., 1991. *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3.* London: IWA Publishing.

Najafpour, G., Sadeghpour, M. & Lorestani, A. Z., 2007. Determination of Kinetic Parameters in Activated Sludge Process for Domestic Wastewater Treatment Plant. *Scientific Paper*, pp. 211-215.

Tchobanoglous, G. & Crites, R., 2010. *Sistemas de Manejo de Aguas Residuales: Para Núcleos Pequeños y Descentralizados.* Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.

Tebutt, T., 1999. *Fundamentos de control de la calidad del agua..* s.l.:Editorial Limusa S.A. De C.V. .

Tejero Gómez, J. L., 2007. *Caracterización del Proceso de Lodos Activados de la Planta Centenario mediante el Método Respirométrico de Pulsos.* Chetumal, Quintana Roo: DCI, Universidad de Quintana Roo.

Tejero Gómez, J. L. et al., 2007. Análisis del Reactor de Lodos Activados de la Planta Centenario. *Caos Conciencia*, pp. 63-71.

Tejero Gómez, J. L. & Romero Ramírez, J. M., 2011. *Planta de Tratamiento de Aguas Residuales "Centenario".* Chetumal, Quintana Roo: CAPA.

Uicab Herrera, J. C., 2011. *Análisis para la Administración de Energía para el Reactor de Lodos Activados de la Planta Centenario de la Ciudad de Chetumal, Quintana Roo.* Chetumal, Quintana Roo: DCI, Universidad de Quintana Roo.

Vera Gorocica, D. C., 2011. *Métodos para la estimación de parámetros cinéticos en reactores de lodos activados de mezcla completa.* Chetumal, Quintana Roo: DCI, Universidad de Quintana Roo.