

MODELADO E IDENTIFICACIÓN DEL PROCESO DE SULFURO OXIDACIÓN EN EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES

Jorge L. Ruiz [†] y Jaime A. Moreno [‡]
 Instituto de Ingeniería
 Universidad Nacional Autónoma de México
 04510 Coyoacán DF, México

Resumen—La remoción biológica de sulfatos es un tratamiento económicamente atractivo. Una metodología para este proceso se basa en dos etapas. En la primera etapa (desasimilatoria) el sulfuro es producido por la reducción de compuestos azufrados en condiciones anaerobias. Posteriormente el sulfuro producido en la primera etapa es biológicamente oxidado y convertido en azufre elemental, pero si este se oxida se convierte nuevamente en sulfato. Para asegurar la remoción de sulfatos y evitar que el azufre se oxide convirtiéndose nuevamente en sulfato es necesario controlar el ciclo biológico del azufre para lo cual es de gran ayuda un modelo que describa cualitativamente el proceso de sulfuro-oxidación, debido a esto en este trabajo se analiza dicho modelo y se plantea una metodología para la identificación de parámetros de la tasa de crecimiento y coeficientes de producción de dicho modelo.

I. INTRODUCCIÓN

El azufre es requerido en la síntesis de proteínas y es liberado en su degradación, es un elemento esencial para el crecimiento de algunos micro organismos, plantas y animales, su contenido dentro de estos varía entre el 0.1 y 1.5 de peso (Lens(2003)).

El sulfuro se oxida a azufre elemental bajo condiciones limitadas de oxígeno por bacterias sulfuro oxidantes. (Annachatre (2000), Burgess (2002)).

Van der Zee (2006) reporta que dicha oxidación se logra a valores de oxígeno por debajo de 0.1 mg/l, observo que al suministrar oxígeno en relaciones estequiométricas, la formación de sulfato es minimizada.

Janssen (1995) estudio la oxidación biológica del sulfuro en un reactor semicontinuo encontrando la formación de sulfato y azufre como productos finales de dicha oxidación. Observo que en biorreactores altamente cargados no todo el sulfuro puede convertirse en azufre debido a una limitación en la actividad biológica.

Bajo esas circunstancias, la auto-oxidación química del sulfuro genera tiosulfato, Van de Ende (1997), confirmo la

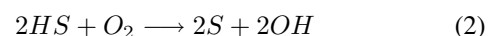
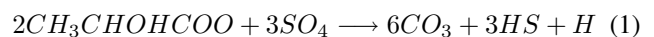
presencia de este fenómeno observando la formación de tiosulfato en un sistema experimental, González-Sánchez (2005) evaluó la contribución del oxígeno en la producción de azufre elemental a partir de tiosulfato.

Janssen (1998), Kumar (2006), González-Sánchez (2006), Pim (2007), Vannini (2008) encontraron que la formación de azufre elemental producto de la oxidación biológica del sulfuro puede ser mejorada por medio del control del estado redox de la solución.

Existe una relación lineal entre la medición de ORP y el logaritmo de la concentración de sulfuro en ambientes naturales, en un biorreactor sulfuro oxidante la medición de ORP puede determinarse por la concentración de sulfuro.

En ambientes controlados, el sulfuro producto de la sulfato-reducción, puede ser oxidado con oxígeno, para producir azufre o sulfato, dependiendo de la cantidad de oxígeno suministrado empleando el CO_2 como fuente principal de carbono (Smets(1998)).

Lo anterior tiene algunas ventajas, tales como: la eliminación de químicos costosos, no se necesita el tratamiento de lodos con contenido excesivo de reactivos, mejora la remoción de materia orgánica y el proceso puede ser estable. Las más importantes bioconversiones de un sistema anaerobio/aerobio son:



En la sulfato reducción (ecuación 1) el sulfato (SO_4) al interactuar con lactato ($2CH_3CHOHCOO$) produce sulfuro (HS) por medio de las bacterias sulfato reductoras bajo condiciones anaerobias.

En la etapa aerobia (ecuaciones 2 y 3) el sulfuro (HS) al oxidarse produce azufre (S) como se puede observar en

[†] JruiM@iingen.unam.mx

[‡] JmorenoP@pumas.iingen.unam.mx, Corresponsal.

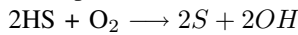
la ecuación 2, o sulfato (ecuación 3) dependiendo de la cantidad de oxígeno usado y la dinámica de la tasas de crecimiento del proceso.

II. MODELADO MATEMÁTICO DE LA SULFURO OXIDACIÓN

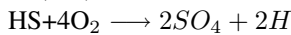
El reactor modelado en el proceso de sulfuro-oxidación es un reactor piloto de laboratorio con un volumen de trabajo de 2 L. La alimentación y purga del agua tratada se lleva a cabo a través de bombas peristálticas cuyo funcionamiento se controla por una computadora. El mezclado se realiza mediante un agitador controlado. La temperatura se controla mediante la recirculación del agua a través de la doble pared del reactor. Está provisto de sensores para medir pH y ORP.

Con propósitos de modelado se parte de la suposición de que el contenido dentro del reactor se encuentra completamente mezclado, tanto en la fase líquida como en la fase gaseosa. El azufre y el sulfato son producidos por un mismo tipo de microorganismos. Se considera el oxígeno en fase líquida y el volumen del reactor es constante. El proceso se desarrolla de manera aerobia (en presencia de oxígeno). Se consideran los casos en el que se presenta tiosulfato y el caso en el cual no está presente.

En el proceso de sulfuro-oxidación (reacción aerobia) existen dos vías posibles de degradación del sulfuro (HS) descritas por las ecuaciones 2 y 3:



el sulfuro (HS) al oxidarse produce azufre(S) más hidróxido (OH).



Al oxidar el sulfuro (HS) con una cantidad mayor de oxígeno (O) se genera sulfato (SO₄).

Se plantea un sistema que represente la dinámica del sulfuro, oxígeno, biomasa, sulfato y azufre.

El balance de materia para el sulfuro (HS) es:

$$\frac{dS_{HS}}{dt} = DS_{inHS} - DS_{HS} - \frac{X}{Y_2}(\mu_S + \mu_{SO_4}) \quad (4)$$

El consumo de sulfuro se representa por el signo negativo del término asociado a las tasas de crecimiento de azufre y sulfato ($\mu_S + \mu_{SO_4}$).

Dónde:

μ_S = Tasa de crecimiento para el azufre [h^{-1}].

μ_{SO_4} = Tasa de crecimiento para el sulfato [h^{-1}].

D = Tasa de dilución [L/h^{-1}].

S_{HS} = Concentración de sulfuro [moles/L].

La ecuación para la biomasa es:

$$\frac{dX}{dt} = -DX + X(\mu_S + \mu_{SO_4}) \quad (5)$$

El balance de materia para el sulfato es:

$$\frac{dSO_4}{dt} = DS_{INSO_4} - DSO_4 + \frac{X}{Y_3}(\mu_{SO_4}) \quad (6)$$

La producción de sulfato se representa mediante el signo positivo, el término asociado a la tasa de crecimiento de sulfato (μ_{SO_4}).

El balance de materia para el oxígeno se divide en parte líquida y gaseosa de la siguiente manera:

-Fase gaseosa

$$\frac{dO_g}{dt} = \frac{\Theta_{gas}}{V_{gas}} - k_L a (O_s - O_l) \quad (7)$$

Dónde:

$k_L a$ = Coeficiente de transferencia de oxígeno [h^{-1}].

O_{gas} = Concentración de oxígeno en fase gaseosa [mol/L].

Θ_{gas} = Flujo de oxígeno en fase gaseosa [mol/L].

V_{gas} = Volumen de fase gaseosa [L].

O_s = Concentración de oxígeno saturado [mol/L].

O_l = Concentración de oxígeno en fase líquida [mol/L].

Suponiendo que la fase gaseosa y líquida del oxígeno alcanzan rápidamente el estado estacionario, la actividad oxidativa del oxígeno no cambia, por lo que el oxígeno en la fase gaseosa se considera en estado estacionario, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$[O]_{gas} = \frac{DO_{ingas} + K_L a O}{\frac{k_L a}{m} + D} \quad (8)$$

Dónde:

D = Tasa de dilución [h^{-1}].

m = Coeficiente de partición.

$k_L a$ = Coeficiente de transferencia de oxígeno [h^{-1}].

O_{gas} = Concentración de oxígeno en fase gaseosa [mol/L].

En la fase líquida se tiene el oxígeno alimentado en fase gaseosa se transfiere a la fase líquida a una tasa $k_L a$.

$$\frac{dO_l}{dt} = D[O_{lin} - O_l] - K_L a (O_s - O_l) - X(\mu_{SO_4} + \mu_S) \quad (9)$$

Dónde:

O_s = Concentración de oxígeno saturado [mol/L].

O_l = Concentración de oxígeno en fase líquida [mol/L].

μ_S = Tasa de crecimiento para el azufre [h^{-1}].

μ_{SO_4} = Tasa de crecimiento para el sulfato [h^{-1}].

El balance de materia para el azufre es:

$$\frac{dS_S}{dt} = -DS_S + \frac{X(\mu_S)}{Y_4} \quad (10)$$

Las tasas de crecimiento para el sulfato y el sulfuro se describen mediante las siguientes ecuaciones:

$$\mu_{SO_4} = \mu_{maxSO_4} \frac{S_{HS}}{K_{HS} + S_{HS} + \frac{HS^2}{K_{HSINHS}}} \frac{O}{K_O + O}^* \quad (11)$$

$$\mu_S = \mu_{maxS} \frac{O}{K_O + O + \frac{O^2}{K_{OINH}}} \frac{S_{HS}}{K_{HS} + S_{HS}}^* \quad (12)$$

* Janssen et al. (1996)

Debido a que se modela un reactor discontinuo (batch), no existe entrada ni salida de caudal del reactor en donde se lleva a cabo la reacción por lo que la tasa de dilución es cero. Se considera un mezclado homogéneo y se considera el oxígeno en la fase líquida por lo que el sistema de ecuaciones (4-12) se transforma como sigue:

$$\frac{dS_{HS}}{dt} = -\frac{X}{Y_2}(\mu_S + \mu_{SO_4}) \quad (13)$$

$$\frac{dX}{dt} = X(\mu_S + \mu_{SO_4}) \quad (14)$$

$$\frac{dSO_4}{dt} = \frac{X}{Y_3}(\mu_{SO_4}) \quad (15)$$

$$\frac{dO_l}{dt} = -K_l a(O_s - O_l) - X(\mu_{SO_4} + \mu_S) \quad (16)$$

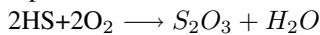
$$\frac{dS_S}{dt} = \frac{X(\mu_S)}{Y_4} \quad (17)$$

Las tasas de crecimiento están dadas por las ecuaciones 11 y 12

Las tasas de crecimiento se consideran de tal forma que a bajas concentraciones de oxígeno y con valores de parámetros adecuados se favorece la producción de azufre, pero a concentraciones cercanas a 4 moles de oxígeno por mol de sulfuro (HS), la producción de sulfato es favorecida sobre la de azufre.

En biorreactores altamente cargados no todo el sulfuro se convierte en azufre debido a una limitación en la actividad biológica. Bajo estas circunstancias, la auto-oxidación química del azufre empieza a ser de importancia relativa y se genera tiosulfato (S_2O_3).

La siguiente ecuación describe la oxidación de sulfuro con producción de tiosulfato:



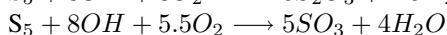
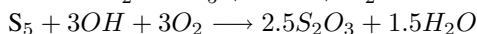
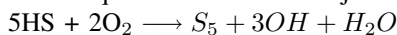
La ecuación diferencial que describe el comportamiento dinámico del tiosulfato es la siguiente:

$$\frac{dS_2O_3}{dt} = \frac{X\mu_{S_2O_3}}{Y_5} \quad (18)$$

La expresión que describe su tasa de crecimiento es:

$$\mu_{S_2O_3} = \mu_{max_{S_2O_3}} \frac{S_{HS}}{K_{HS} + S_{HS}} \frac{O}{K_O + O} \quad (19)$$

Bajo condiciones alcalinas (pH>9) la oxidación química abiótica puede generarse en gran cantidad, el pentasulfuro es una de las especies predominantes producidas por la oxidación química del sulfuro bajo condiciones alcalinas.



Una expresión cinética para la sulfuro oxidación química es:

$$r_{HS} = -K_{obs}[HS]^x \quad (20)$$

donde K es la tasa de reacción constante y x el orden de la reacción.

La expresión cinética para la sulfuro oxidación química a pentasulfuro se estima para la máxima tasa de consumo de oxígeno correspondiente a cada concentración inicial de sulfuro y se suma a la oxidación biológica del sulfuro.

III. IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS

El proceso de identificación para la sulfuro-oxidación se basa en encontrar el valor de los parámetros de la tasa de crecimiento y los coeficientes de producción máximos presentes en el modelo de la sulfuro-oxidación.

A. Coeficientes de producción

Del modelo del sistema (11-17) es posible obtener el coeficiente de producción máximo presente en la dinámica de sulfuro.

La variación del sulfuro y de la biomasa involucra las tasas de crecimiento en sus ecuaciones, por lo que es posible despejarla de ambas ecuaciones y posteriormente formular una igualdad.

De la ecuación 14 se tiene:

$$\frac{dX}{dt} = X(\mu_S + \mu_{SO_4}) \quad (21)$$

De la ecuación 13 se tiene:

$$\frac{dS_{HS}}{dt} = \frac{X}{Y_2}(\mu_S + \mu_{SO_4}) \quad (22)$$

Como puede observarse de las ecuaciones anteriores es posible despejar las expresiones en función de la biomasa multiplicada por las tasas de crecimiento del azufre y del sulfato, posteriormente se igualan dichas expresiones para obtener la ecuación 24.

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{Y_2 dS_{HS}}{dt} \quad (23)$$

Integrando en ambos lados de la igualdad, resolviendo la integral y evaluando sus límites se tiene:

$$X(t) - X(t_0) = -Y_2(S_{HS}(t) - S_{HS}(t_0)) \quad (24)$$

De esta ecuación se obtiene el valor del coeficiente Y_2 (sulfuro).

$$Y_2 = \frac{X(t) - X(t_0)}{S_{HS}(t) - S_{HS}(t_0)} \quad (25)$$

Como puede observarse en la ecuación (25) el valor del coeficiente de producción del sulfuro (Y_2) se obtiene sin emplear el dato de la tasa de crecimiento.

Con la ayuda de simulaciones o datos experimentales es posible obtener los valores del sulfuro y la biomasa para instantes específicos. En el caso de la biomasa se mide la cantidad de biomasa al inicio de cada ciclo y al final de este, por lo que el coeficiente de producción máxima del sulfuro (HS) puede determinarse.



Para obtener los valores de los coeficientes restantes se sigue el siguiente procedimiento:

Considerando la ecuación 13, al sustituir los valores de las tasas de crecimiento del sulfuro y sulfato (μ_s, μ_{SO_4}), despejndolasdelasecuaciones15y17setiene :

$$\frac{dS_{HS}}{dt} = -\frac{X}{Y_2} \left(\frac{Y_4}{X} \frac{dS_S}{dt} + \frac{Y_3}{X} \frac{dS_{SO_4}}{dt} \right) \quad (26)$$

Integrando esta igualdad en ambos lados se genera:

$$\int_{S_{HS}(t_0)}^{S_{HS}(t)} dS_{HS} = \frac{X}{Y_2} \left(\int_{S(t_0)}^{S(t)} \frac{Y_4}{X} dS_S + \frac{Y_3}{X} dS_{SO_4} \right) \quad (27)$$

Resolviendo la integral y evaluando los límites finalmente arrojan la siguiente ecuación.

$$\frac{1}{Y_2} [Y_4(S_S(t) - S_S(t_0)) + Y_3(S_{SO_4}(t) - S_{SO_4}(t_0))] =$$

$$(S_{HS}(t) - S_{HS}(t_0)) \quad (28)$$

Sustituyendo los valores de sulfuro, azufre y sulfato en diversos instantes de tiempo es posible generar un sistema de ecuaciones simultáneas, empleando algoritmo de mínimos cuadrados lineales se obtienen los valores de Y_3 (sulfato)y Y_4 (azufre).

B. Parámetros de la tasa de crecimiento

Para poder identificar los parámetros de la tasa de crecimiento se plantearon experimentos que se fundamentan en que la tasa de crecimiento (μ) tiene una estructura matemática que permite simplificar la expresión al realizar una serie de consideraciones sobre los elementos relacionados en esta ecuación.

De la ecuación 13 se tiene:

$$\frac{dS_{HS}}{dt} = -\frac{X}{Y_2} (\mu_S + \mu_{SO_4}) \quad (29)$$

Sustituyendo los valores de μ_S y μ_{SO_4} setiene :

$$\frac{dS_{HS}}{dt} = \frac{X}{Y_2} \left(\frac{S_{HS}\mu_{maxS}}{K_{HS} + S_{HS}} \frac{O}{K_O + O + \frac{O^2}{K_{OI}}} + \frac{S_{HS}\mu_{maxSO_4}}{K_{HS} + S_{HS} + \frac{S_{HS}^2}{K_{HSI}}} \right) \quad (30)$$

La ecuación posee una estructura matemática que permite simplificar la expresión considerando un elevado valor de oxígeno la expresión que lo involucra junto con su constante de afinidad (K_O) tiende a un valor unitario debido a que dicha constante de afinidad no provoca un efecto considerable ante altas concentraciones de oxígeno, esto es por tener una estructura del tipo Monod. Para la función tipo Haldane (sulfuro) al incrementar la cantidad de oxígeno el término asociado a esta expresión tiende a ser despreciable.

Con base a dichas consideraciones se proponen experimentos con los cuales sea posible obtener los parámetros adecuadamente y generar la siguiente expresión:

$$\frac{dS_{HS}}{dt} = \frac{X}{Y_2} \left(\frac{S_{HS}\mu_{maxSO_4}}{K_{HS} + S_{HS} + \frac{S_{HS}^2}{K_{HSI}}} \right) \quad (31)$$

Integrando ambos lados de la expresión y considerando a la biomasa constante se tiene:

$$-X \int_{t_0}^t \frac{dt}{Y_2} = \frac{1}{\mu_{maxSO_4}} \int_{S_{SO_4}(t_0)}^{S_{SO_4}(t)} \left(\frac{K_{HS}}{S_{HS}} + 1 + \frac{S_{HS}}{K_{HSI}} \right) dS_{HS} + Y_3 [S_{HS}(t) - S_{HS}(t_0)] dt = X(t) - X(t_0) \quad (32)$$

Para encontrar los parámetros de la tasa de crecimiento sulfuro se resuelve la ecuación 32:

$$\frac{1}{\mu_{maxSO_4}} [K_{HS} \ln \left(\frac{S_{HS}(t)}{S_{HS}(t_0)} \right) + S_{HS}(t) - S_{HS}(t_0) + \frac{1}{k_{HSI}} \frac{S_{HS}^2(t) - S_{HS}^2(t_0)}{2}] = -\frac{X(t - t_0)}{Y_2} \quad (33)$$

De esta ecuación (34) es posible obtener un sistema de ecuaciones después de sustituir los valores de sulfuro, biomasa y coeficientes de producción y ponerlo en la forma $Y(t) = \Phi^T \Theta(t)$.

Para los parámetros asociados a la tasa de crecimiento del oxígeno se sustituye en la ecuación 16 las expresiones de las tasas de crecimiento del azufre (12) y del sulfato (11) obteniendo la siguiente expresión:

$$\frac{dO_l}{dt} = -K_l a(O_s - O_l) - X \left(\frac{\mu_{maxS} S_{HS}}{K_{HS} + S_{HS}} \frac{O}{K_O + O + \frac{O^2}{K_{inO}}} + \left(\frac{\mu_{maxSO_4} O}{K_O + O} \frac{S_{HS}}{K_{HS} + S_{HS} + \frac{S_{HS}^2}{K_{HSI}}} \right) X \right) \quad (34)$$

En la ecuación anterior con la finalidad de obtener sus parámetros se incrementa la cantidad de sulfuro a un grado que las constantes de afinidad del sulfuro sean despreciables tal que la expresión tipo Monod tienda a un valor unitario y la expresión tipo Haldane tienda a un valor despreciable generando la siguiente expresión:

$$\frac{dO}{dt} = X \left[\frac{O\mu_{maxSO_4}}{K_O + O + \frac{O^2}{K_O}} \right] - k_l a(O_s - O) \quad (35)$$

Esta expresión no se puede integrar directamente, por lo que se procede a resolverla numéricamente calculando previamente una aproximación de la derivada del oxígeno.

Sustituyendo valores de oxígeno para distintos instantes de tiempo se puede formular un sistema de ecuaciones y ponerlo en la forma $\psi^T(t)\Theta$.

Este tipo de sistemas pueden resolverse empleando el algoritmo de identificación de mínimos cuadrados lineales.

IV. SIMULACIONES

Para el proceso de sulfuro-oxidación se pueden observar las siguientes simulaciones:

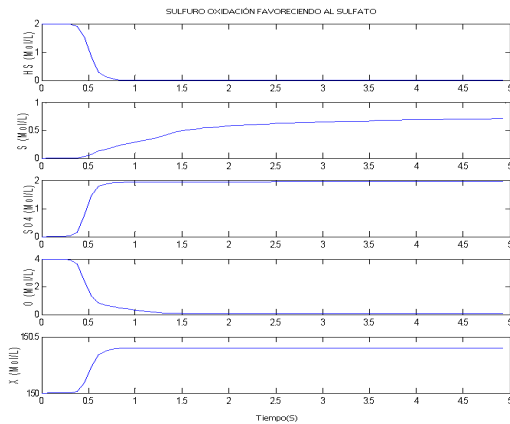


Figura 1. Proceso de sulfuro oxidación favoreciendo al sulfato

La formación de sulfato y azufre a partir de la oxidación del sulfuro puede ser controlada por la cantidad de oxígeno suministrado.

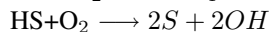
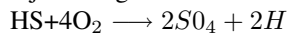
Los parámetros empleados en la simulación se ilustran en la tabla 1.

Parámetro	Valor	Unidades
μ_{maxS}	0.6	h^{-1}
K_{HS}	0.28	mol/L
K_O	0.001	mol/L
K_{OIN}	0.025	mol/L
μ_{maxSO_4}	7.2	h^{-1}
K_{HS2}	0.98	mol/L
K_{HSIN}	0.48	mol/L
O	4	mol/L
HS	2	mol/L
K_O	0.198	mol/L

TABLA I

PARÁMETROS PARA LA SULFURO OXIDACIÓN FAVORECIENDO LA PRODUCCIÓN DE SULFATO

Como puede observarse en la figura 1. la simulación refleja las siguientes reacciones:



Al introducir dos moles de sulfuro y al incrementar el oxígeno a cuatro moles de oxígeno se generan dos moles de sulfato y una cantidad pequeña de azufre.

Cuando se incrementa el oxígeno la tasa de crecimiento del azufre al poseer una estructura del tipo Haldane (para el oxígeno) empieza a disminuir a diferencia de la tasa de crecimiento del sulfato (para el oxígeno) en la que no se presenta este fenómeno por tener una estructura del tipo Monod. Por lo anterior es necesario controlar el suministro de oxígeno en el proceso debido a que con la variación

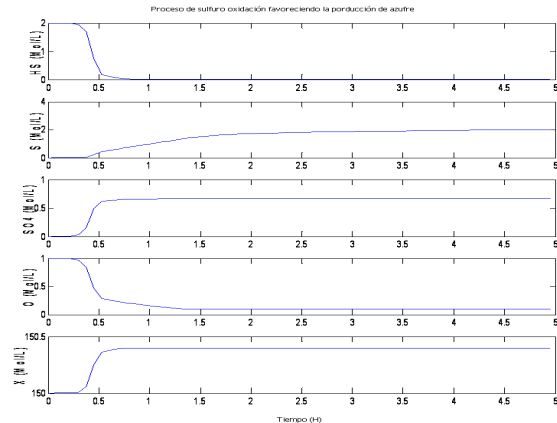


Figura 2. Proceso de sulfuro oxidación favoreciendo al azufre

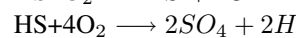
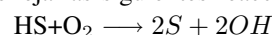
de este podemos favorecer la producción de azufre o de sulfato, la finalidad es favorecer la producción de azufre. Los parámetros empleados en la simulación se ilustran en la tabla 2.

Parámetro	Valor	Unidades
μ_{maxS}	0.6	h^{-1}
K_{HS}	0.28	mol/L
K_O	0.001	mol/L
K_{OIN}	0.025	mol/L
μ_{maxSO_4}	7.2	h^{-1}
K_{HS2}	0.98	mol/L
K_{HSIN}	0.48	mol/L
K_O	0.198	mol/L
HS	2	mol/L
O	1	mol/L

TABLA II

PARÁMETROS PARA LA SULFURO OXIDACIÓN FAVORECIENDO LA PRODUCCIÓN DE AZUFRE

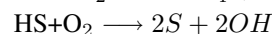
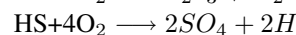
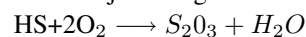
Como puede observarse en la figura 2. la simulación refleja las siguientes reacciones:



Se favorece la producción de azufre debido a la estructura de las tasas de crecimiento del azufre (ecuación 12), del sulfato (11) y de los parámetros empleados que hacen que se favorezca la producción de azufre elemental.

Al introducir dos moles de sulfuro y un mol de oxígeno se generan dos moles de azufre y una cantidad pequeña de sulfato, por lo que bajo estas condiciones se favorece la producción de azufre. Los parámetros empleados en la simulación (figura 3.) se ilustran en la tabla 3.

Como puede observarse en la figura anterior la simulación refleja las siguientes reacciones:



Parámetro	Valor	Unidades
μ_{maxS}	0.6	h^{-1}
K_{HS}	0.28	mol/L
K_O	0.001	mol/L
K_{OIN}	0.025	mol/L
μ_{maxSO_4}	7.2	h^{-1}
K_{HS2}	0.98	mol/L
K_{HSIN}	0.48	mol/L
K_O	0.198	mol/L
HS	2	mol/L
O	2	mol/L

TABLA III
PARÁMETROS PARA LA SULFURO OXIDACIÓN GENERANDO
TIOSULFATO

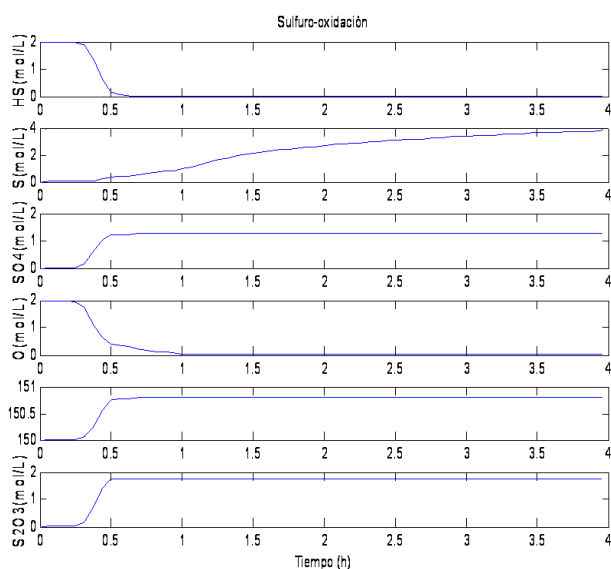


Figura 3. Proceso de sulfuro oxidación con producción de tiosulfato

Al introducir dos moles de sulfuro y al incrementar el oxígeno a dos moles se genera sulfato, azufre y un nuevo subproducto (tiosulfato) además del azufre y el sulfato producidos, debido a que no todo el sulfuro se convierte en azufre debido a una limitación en la actividad biológica. La auto-oxidación química del azufre genera tiosulfato.

El método de identificación de parámetros propuesto se implemento para obtener los parámetros asociados a las tasas de reacción y coeficientes de producción para el sulfuro y el oxígeno, en principio se realizaron simulaciones bajo condiciones de reactivos limitantes para el sulfuro y el oxígeno con la finalidad de obtener los parámetros.

Los parámetros obtenidos se emplearon para realizar simulaciones bajo condiciones normales de operación y comparar el comportamiento del sulfuro y del oxígeno tal como se puede observar en la figura 4.

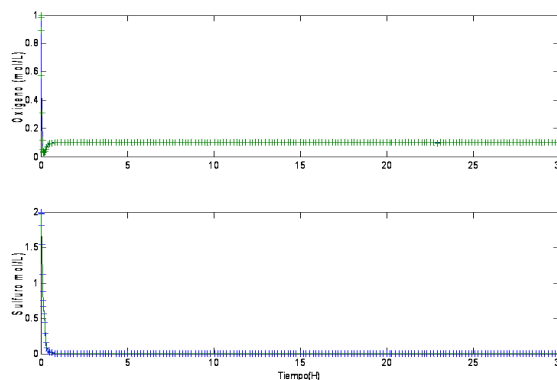


Figura 4. Proceso sulfuro oxidante con parámetros estimados.

V. CONCLUSIONES

El modelo de sulfuro oxidación desarrollado e ilustrado a través de las graficas producidas por el simulador (desarrollado en el programa Simulink de Matlab) predice el comportamiento del proceso sulfuro oxidante ilustrando la producción de sulfato, azufre y tiosulfato a partir de la oxidación de sulfuro, cabe destacar que una identificación y empleo de los parámetros de los coeficientes de producción y la tasa de reacción implica que el modelo describa con mayor precisión el fenómeno.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Ingeniería UNAM por el apoyo en el proyecto PAPIIT IN-112207 (Observación y control de sistemas con parámetros distribuidos y/o no linealidades multivaluadas mediante disipatividad).

VII. REFERENCIAS

1. A.P. Annachatre and S. Suktrakoolvait. Biological sulfide oxidation in a fluidized bed reactor. Environmental technology, 2:661-672,(2000).
2. A. González-Sánchez, S. Alcántara, E. Razo-Flores and S. Revah. Oxygen transfer and consumption in a thiosulfate oxidizing bioreactor with sulfur production. Letters in applied microbiology. 41:141-146,(2005).
3. P.Lens, M. Vallero, G. Esposito and M. Zandvoort. Perspectives of sulfate reducing bioreactors in environmental biotechnology. Reviews in environmental science and biotechnology 1:311-325 Kluwer academic publishers,(2003).
4. Janssen A.J.H, R. Sieyster,J.Bontsema, G. Lettinga, "Biological Sulphide Oxidation in a fed-Batch Reactor", Biotechnology and Bioengineering, vol 47,327-330,(1995).
5. Janssen A.J.H, Meijer S., Bontsema J., Lettinga G. "Application of the redox potencial for controlling a sulfide oxidizing biorreactor", Biotechnology and Bioengineering, 60(1), 147-155,(1998).
6. Pim L.F. van den Bosch, Otto C van Beusekom, Cees J.N. Buisman, Albert J.H. Janssen.sulfide oxidation at halo



alkaline conditions in a fed-batch bioreactor. *Biotechnology and bioengineering* 97:5 pp 1053-1063,(2007).

7. Samir Kumar Khanal, Ju-Chang Huang. Online oxygen control for sulfide oxidation in anaerobic treatment of high sulfate wastewater. *Water environment research* 78:397-407,(2006).

8. Smet,E. ,Lens P. y Van Langenhove, H. Treatment of waste gases contaminated with odorous sulfur compounds *crit. rev. Environ.Sci.Technol.* 28(1):89-117,(1998).

9. Claudia Vannini, Giulio Munz, Gualtiero Mori, Claudio Lubello, Franco Verni, Giulio Petroni. Sulphide oxidation to elemental sulphur in a membrana birreactor: performance and characterization of selected microbial sulphur oxidizing community. *Systematic and applied microbiology* pp 2-13,(2008).

10. F.P. Van der Zee, S. Villaverde, P.A. García, F. Fdz Polaco.(2006) Sulfide removal by moderate oxigenation of anaerobic sludge environments. *Bioresource Technology* 98: 518-524,(2006).

11. Van de Ende, P.F., Meier, J. and van Germenden, H. Syntrophic growth of sulphate-reducing bacteria and colorless sulfur bacteria during oxigen limitation. *FEMS Microbiol. Ecol.* 23, 65-80,(1997).