

Control por Búsqueda de Extremos para Maximizar la Productividad de un Fotobiorreactor de Producción de Microalgas^{*}

Algemiرو Gil, Ixbalank Torres, Mario Ibarra

*CA Telemática, Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías
campus Irapuato-Salamanca, Carretera Salamanca - Valle de Santiago
km 3.5 + 1.8, Comunidad de Palo Blanco Salamanca, Gto. C.P.
36885, México, (e-mail: algifer53@gmail.com, ixbalank@ugto.mx,
ibarram@ugto.mx).*

Abstract: Este artículo presenta la implementación de un controlador por búsqueda de extremos para maximizar la productividad de un fotobiorreactor de producción de microalgas. La concentración de biomasa es considerada como la variable medida, mientras que la tasa de dilución es considerada como la variable de optimización. Por otro lado, se realizó un estudio para verificar la robustez de la estrategia con respecto a un ruido blanco en la salida medida y con respecto a incertidumbres en los parámetros del modelo. La factibilidad de la estrategia es demostrada por medio de simulaciones sobre un modelo típico del proceso de producción de microalgas.

Keywords: Optimización en línea, control por búsqueda de extremos, producción de microalgas.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día es muy común encontrar cultivos de microalgas en diferentes partes del mundo debido a que en estas últimas décadas se han convertido en una alternativa interesante de descontaminación pasiva gracias a sus diversos usos en beneficio del medio ambiente y de los humanos. Un ejemplo rápido de los usos de estos microorganismos, es el tratamiento de aguas residuales y/o la producción de energía limpia (Fse (2014)). También es de notar que las microalgas no sólo tienen esos usos, sino que además a partir de la producción de biomasa pueden ser extraídos compuestos naturales como aditivos alimentarios, alimentos medicinales, antioxidantes, cosméticos y biofertilizantes (Santo (2014)).

Para comprender las dinámicas de un fotobiorreactor de producción de microalgas, sus estados son continuamente monitoreados ya que a partir de estos datos que son recolectados se pueden obtener modelos dinámicos (Mairet et al. (2011a)). Además, teniendo los modelos se pueden desarrollar estrategias de optimización que permitan alcanzar las condiciones máximas de operación del proceso. El Control por Búsqueda de Extremos (CBE)

es una estrategia de optimización en línea que ha sido utilizada en los últimos años como una alternativa para optimizar procesos de producción de microalgas. Por ejemplo, (Deschenès and Vande (2015)) propusieron una estrategia para maximizar la productividad de biomasa en un fotobiorreactor de producción de microalgas controlando la intensidad luminosa. (Bayen et al. (2013)) propusieron la optimización de un proceso de producción de microalgas dentro de un sistema de conducción eléctrico. En otro trabajo también aparece, un artículo de (Krstić (2000)), quienes propusieron la inclusión de un compensador dinámico en el algoritmo de búsqueda de valor extremo que mejora las propiedades de estabilidad y rendimiento del mismo método. Este compensador se agrega al integrador para adaptación y mejora de la señal de respuesta y la fase de grado relativo global de dicho control. Otras publicaciones relacionadas con este tipo de control son los de (Guay and Dochain (2015)) y (Guay et al. (2015)), donde en el primer trabajo se considera la solución de un problema de optimización en tiempo real mediante el control adaptativo por búsqueda de extremos, suponiendo que las ecuaciones que describen la dinámica del sistema no lineal y la función de costo a ser minimizada son desconocidas y que la función objetivo puede ser medida; en el otro trabajo mencionado, los autores proponen un enfoque de control de búsqueda de

^{*} Este trabajo es financiado por el CONACyT y el programa PRODEP-SEP

valor extremo para una clase de sistemas dinámicos no lineales de incertidumbre con limitaciones, donde suponen que la función objetivo, junto con las restricciones están disponibles para la medición. Por ello su contribución es formular el problema del valor por búsqueda de extremos solucionándolo como un problema de estimación de variables en el tiempo.

En este artículo se presenta un controlador por búsqueda de extremos para maximizar la producción de microalgas de tipo *Isochrysis Affinnis Galbana*, aplicado al modelo de crecimiento de microalgas presentado en (Mairet et al. (2011b)), controlando (optimizando) la tasa de dilución. La intensidad luminosa es considerada una entrada no controlada del sistema (considerada como una perturbación), mientras que la única variable medida que usa el controlador es la biomasa. El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se describe el modelo matemático del fotobiorreactor de producción de microalgas. En la sección 3 se describe el control por búsqueda de extremos, especificando sus características y la implementación del mismo. Luego, en la sección 4 se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo del artículo. Seguidamente, se tiene la sección 5 donde se encuentran las conclusiones, y por último se muestra la bibliografía de la información consultada.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo de crecimiento de microalgas es extraído de una investigación realizada por otros autores (Mairet et al. (2011a)), en donde se habla de microalgas del tipo *Isochrysis Affinnis Galbana* cultivadas en un fotobiorreactor bajo ciertas condiciones con variaciones de Luz durante ciclos de día y de noche. Además dentro de su diseño se consideró el clásico modelo **Droop**, para describir las cinéticas acordes a las foto-aclimatación y a la foto-inhibición vistas realmente como la Luz de absorción y de difusión respectivamente, muy importantes para representar los efectos de la vitamina B_{12} .

2.1 Modelo Droop

El modelo **Droop** básico (Mairet et al. (2011a)) describe las dinámicas de crecimiento de microalgas de tipo *Isochrysis Galbana*, representando los efectos de los macronutrientes tales como el nitrógeno, como elemento vital e importante para el crecimiento de estos microorganismos. El modelo relaciona principalmente tres dinámicas, en donde se considera en primer lugar la concentración externa del nitrógeno nutriente s , luego el crecimiento de la biomasa x y por último la cuota limitada de nutrientes q_n . La tasa de crecimiento de las microalgas y la tasa de absorción de los nutrientes se hallan incluidas en el modelo al igual que el efecto de las limitaciones de nitrógeno en carbohidratos, muestran que cuando se incorporan acumulaciones de lípidos neutros bajo luz continua éstas involucran el carbono del CO_2

como azúcar para que los carbohidratos sean movilizados hasta producir carbono funcional (se producen proteínas cuando las microalgas consumen nitrógeno). Los carbohidratos son utilizados para producir Ácidos Grasos Libres (en inglés *FFA*: Free Fatty Acids), que llegan a ser almacenados como lípidos neutrales o movilizados para producir membranas esenciales para el carbono funcional (Mairet et al. (2011a)).

También lleva incluido el efecto de la luz sobre las dinámicas de crecimiento (Mairet et al. (2011a)). En primer lugar, para el efecto de foto-inhibición la luz está incluida representando su variación la cual es relacionada con el modelo de **Eilers y Peeters**, que considera la fotoinhibición influyente en el proceso de la fotosíntesis. Para la foto-aclimatación, se presenta la relación entre la clorofila y las partículas de nitrógeno, en donde la concentración de clorofila Chl se relaciona con las proteínas celulares y también con las partículas de nitrógeno comprendida por la luz necesaria recibida, involucrada en dicho proceso para que las células obtengan su foto-aclimatación (es vista en la clorofila). Dentro del modelo la intensidad promedio es igual a la intensidad total medida en unidades de $\mu.mol.m^{-2}.s^{-1}$. La intensidad de luz de entrada es notada como I indicando que es la intensidad total, mientras que I^* es un estado del sistema que indica la absorción de luz de las microalgas (es un indicador simplemente).

2.2 Dinámicas del Modelo

El modelo matemático resultante sobre el crecimiento de las microalgas (Mairet et al. (2011a)) que se utilizará está representado como $\dot{\chi} = f(\chi, I, D, S_{in})$, y viene descrito el vector de estados como $\chi = [s, q_n, x, q_l, I^*]^T$, donde se sabe que s es el nitrato en $g[N]/m^3$, q_n la cuota de nitrógeno dada en unidades de $g[N]/g[C]$, x la biomasa en $g[C]/m^3$, q_l la cuota de lípidos en unidades de $g[C]/g[C]$, y I^* representa la irradiancia en unidades de $\mu mol.m^2.s^{-1}$. Las entradas del sistema se conocen como la intensidad luminosa I dada en unidades de $\mu mol.m^2.s^{-1}$, la tasa de dilución D dada en unidades de días d^{-1} y la concentración de nitrato influyente S_{in} en unidades de $g[N]/m^3$. Se debe aclarar que las unidades de $g[C]$ representan gramos de carbono, $g[N]$ gramos de nitrógeno.

Quedan representadas entonces las dinámicas del modelo no lineal de crecimiento de microalgas por el sistema de ecuaciones diferenciales (1):

$$\begin{aligned}
 \dot{s} &= D(S_{in} - s) - \rho(s, I, q_n) x \\
 \dot{q}_n &= \rho(s, I, q_n) - [\mu(q_n, I) - R(s, I, q_n)] q_n \\
 \dot{x} &= [\mu(q_n, I) - D - R(s, I, q_n)] x \\
 \dot{q}_l &= [\beta q_n - q_l] \mu(q_n, I) - \gamma \rho(x, \bar{I}) + R(s, I, q_n) q_l \\
 \dot{I}^* &= \mu(q_n, I) (\bar{I} - I^*)
 \end{aligned} \tag{1}$$

donde $\mu(q_n, I)$, $\rho(s, I, q_n)$ y $R(s, I, q_n)$ describen la tasa de crecimiento, la tasa de absorción de los nutrientes y un término para representar la respiración de los microorganismos, respectivamente. Estas expresiones son mostradas finalmente en las ecuaciones (2), (3), y (4):

$$\mu(q_n, I) = \tilde{\mu} \left(1 - \frac{Q_o}{q_n} \right) \left(\frac{I}{I + K_{sI} + \frac{I^2}{K_{iI}}} \right) \quad (2)$$

$$\rho(s, I, q_n) = \tilde{\rho}(s) \left[\eta + (1 - \eta) \left(\frac{I^m}{I^m + \epsilon_I^m} \right) \right] \left(1 - \frac{q_{in}}{Q_l} \right) \quad (3)$$

$$R(s, I, q_n) = r_0 + r_1 \rho(s, I, q_n) \quad (4)$$

Con la (4) se supone que sólo los hidratos de carbono se utilizan para la respiración buscando compensar la absorción de nitrógeno. En las ecuaciones enunciadas anteriormente se muestran parámetros como: K_{sI} que se refiere al coeficiente de saturación media respecto a la luz, K_{iI} que es un coeficiente de inhibición y $\tilde{\mu}$ define la tasa de crecimiento máxima hipotética. También está Q_l definido como la máxima cuota de nitrógeno, η que es el factor de reducción de la absorción de nitrógeno durante la noche. La expresión (5) es la tasa de absorción del modelo Droop sin considerar la luz.

$$\tilde{\rho}(s) = \bar{\rho} \left(\frac{s}{s + K_s} \right) \quad (5)$$

donde r_0 es la tasa de respiración de mantenimiento y r_1 es el coeficiente del costo de la biosíntesis. El efecto de la clorofila viene dada por la expresión (??):

$$Chl = \phi(I^*) x q_n \quad (6)$$

sabiendo que $\phi(I^*)$ describe la relación entre el estado de la irradiancia con la clorofila. La ecuación (??) relaciona las partículas de nitrógeno con la inhibición:

$$\phi(I^*) = \phi_{max} \left(\frac{K_{I^*}}{I^* + K_{I^*}} \right) \quad (7)$$

de la expresión anterior se observa que ϕ_{max} es la relación máxima de la clorofila con partículas de nitrógeno mientras que K_{I^*} es la constante de inhibición de luz media para la fotoaclimatación. Otra expresión importante se halla en (8) representando el efecto que tiene la clorofila sobre la biomasa.

$$K_{sI} = K_{sI}^* \left(\frac{x}{Chl} \right) \quad (8)$$

Nota: hay que tener en cuenta que para este modelo se consideró que $\bar{I} = I$ (la intensidad luminosa promedio es la misma intensidad luminosa total que dentro del sistema representa la entrada no controlable). Es conveniente justificar que la intensidad luminosa promedio al considerarse igual a la intensidad luminosa total lo que se hace es asumir que la intensidad es homogénea (Mairet et al. (2011a)). Simplemente es suponer que físicamente las microalgas tienen la posibilidad de recibir luz de una lámpara con poca potencia tomando eso como un valor constante que representa \bar{I} y adicionalmente la perturbación que está dada por la intensidad luminosa I representada por los rayos del Sol.

La tabla 1 muestra los valores de todos los parámetros empleados en el modelo real de las microalgas. Es necesario mencionar que los parámetros mostrados en dicha tabla fueron obtenidos experimentalmente en la identificación del modelo (Mairet et al. (2011a)).

Parámetro	Valor	Medida
$\tilde{\mu}$	$7.8 d^{-1}$	Tasa máxima teórica de crecimiento específico
Q_o	$0.046 g[N].g[C]^{-1}$	Cuota mínima de nitrógeno
K_{sI}^*	$1.4 \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$	Constante de saturación media Haldane
K_{iI}	$2195 \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$	Constante de inhibición de sustrato Haldane
$\bar{\rho}$	$0.33 g[N].g[C]^{-1}.d^{-1}$	Tasa de absorción máxima de nitrógeno
K_s	$0.0012 g[N].m^{-3}$	Constante media de saturación para absorción de nitrógeno
η	0.19	Factor de reducción de absorción de nitrógeno durante la noche
Q_l	$0.20 g[N].g[C]^{-1}$	Cuota máxima de nitrógeno
r_0	$0.01 d^{-1}$	Tasa de respiración de mantenimiento
r_1	$1.3 g[C].g[N]^{-1}$	Coefficiente del costo de la biosíntesis
α	$3 g[C].g[N]^{-1}$	Coefficiente de síntesis de proteínas
β	$3.8 g[C].g[N]^{-1}$	Coefficiente de síntesis de ácidos grasos
γ	$2.9 g[C].g[N]^{-1}$	Coefficiente de movilización de ácidos grasos
ϕ_{max}	$0.9 g[Chl].g[N]^{-1}$	Relación máxima de la clorofila con partículas de nitrógeno
k_I^*	$93 \mu mol.m^{-2}.m^{-1}$	Constante de inhibición de luz media para la fotoaclimatación
a	$16.2 m^2.g[Chl]^{-1}$	Coefficiente de absorción de luz asociada con la clorofila
b	$0.087 m^{-1}$	Coefficiente de absorción de luz base
L	12 m	Longitud del recipiente
E_I	$10 \mu mol.fot.m^{-1}.s^{-1}$	Constante de disociación de la Luz
n	0.19	Constante de referencia para la eficiencia de absorción de la luz
m	3	Constante de Hill
\bar{I}	$1 \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$	Intensidad promedio

Tab. 1. Parámetros del modelo.

3. CONTROL POR BÚSQUEDA DE EXTREMOS

La estrategia de Control por Búsqueda de Extremos (CBE) conocida por su acrónimo en inglés *ESC (Extremum Seeking Control)* permite obtener soluciones de problemas de optimización en control con la facilidad de manejar relaciones entre la reducción de sensibilidad y el rechazo de las perturbaciones del sistema que se considera. Es además, una estrategia de control no lineal basada

en optimización de modelos en línea, el cual se enfoca en problemas dinámicos donde la información disponible de un sistema es limitada.

3.1 Control por Búsqueda de Extremos manipulando la Tasa de Dilución

En un fotobiorreactor continuo perfectamente mezclado la productividad de biomasa volumétrica es función de la concentración de biomasa x $g[C]m^{-3}$ y la tasa de dilución D d^{-1} . Se considera entonces que para la realización del control optimizante se debe tener una función objetivo a la cual se pretende hallar su máximo a partir de una entrada que es manipulada para obtener el valor óptimo de esa entrada (Ariyur and Krstic (2003)). La función objetivo $f(D)$ de este sistema está representada por la producción de las microalgas P la cual se expresa de la forma vista en la ecuación (9):

$$P(g.Vol^{-1}.d^{-1}) = D(d^{-1}) \times x(g.Vol^{-1}) \quad (9)$$

la concentración de biomasa x es la salida medida en el modelo, que luego multiplicada por D permite calcular la producción de biomasa por da. Es necesario indicar que para medir la biomasa x en línea se utiliza un sensor que relaciona la absorbancia con la concentración de biomasa. La absorbancia se mide en escala logarítmica, relacionando los rayos de la intensidad de luz incidentes sobre una muestra de microalgas y los rayos de intensidad de esa misma luz que es transmitida a través de esa muestra de dichos microorganismos. Otra aclaración que hay que hacer es que como el proceso de producción de microalgas es muy lento, se consideró que el tiempo para tomar medidas fuese por día (Mairet et al. (2011a)). El sistema de producción de microalgas, como se había comentado anteriormente, consta de tres entradas I , S_{in} y D en donde es importante mencionar para este caso que la intensidad luminosa I depende de una fuente externa (el Sol) y para nosotros no es conveniente manipularla, porque es una entrada necesaria para el proceso pero que a su vez se puede considerar como una perturbación para nuestro sistema. La otra entrada correspondiente a la concentración de nitrato influente S_{in} se mantiene constante para asegurarnos que la biomasa está recibiendo alimento y pueda absorber los nutrientes rápidamente para su crecimiento. Por último se halla la tasa de dilución D representando la entrada manipulada del sistema con la que se realizará dicho control.

En la figura 1 se muestra el esquema empleado para la implementación del control por búsqueda de extremos, tomando como entrada $u(t)$ la tasa de dilución y como $y(t)$ la salida del sistema correspondiente a la producción de biomasa.

con respecto al esquema anterior la ley de control viene dada por las expresiones mostradas en (10),

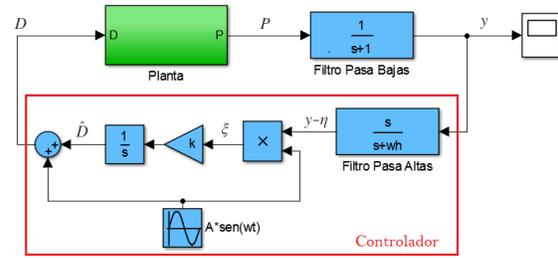


Fig. 1. Esquema de control por búsqueda de extremos manipulando la tasa de dilución D para la obtención de la máxima producción de microalgas P .

$$\begin{aligned} \dot{y} &= P(t) - y(t) \\ \dot{\eta} &= w_h[y(t) - \eta(t)] \\ \dot{\hat{D}} &= w_h k A [y(t) - \eta(t)] \text{sen}(wt) \end{aligned} \quad (10)$$

donde la entrada de control se define como en la ecuación (11)

$$D(t) = \hat{D} + A \text{sen}(wt) \quad (11)$$

Se observa también en la figura 1 los bloques que componen el esquema del control diseñado, (Ariyur and Krstic (2003)). Aparece primeramente el bloque de la planta, en donde se encuentra plasmado el modelo que describe las dinámicas de crecimiento de las microalgas con variable de entrada la tasa de dilución D y variable de salida la producción de biomasa P . El siguiente bloque es el que describe el filtro pasa bajas, quien recibe la señal proveniente de la variable de salida de la planta con una función específica de permitir simplemente el paso de frecuencias menores a $1 \text{ rad } d^{-1}$ y reducir los picos de la señal de producción de biomasa que podrían mostrarse en un medidor, y en su efecto que la salida final $y(t)$ sea una señal más limpia. Otro bloque que se halla dentro del esquema es un filtro pasa altas, que tiene una frecuencia de corte de w_h y es aplicado a la salida $y(t)$ en el inicio del control para remover las componentes en CD que va en dicha señal y permitir el paso de la componente en CA con frecuencia de corte w_h . A continuación a la salida de este bloque se añade la multiplicación de una señal sinusoidal con amplitud A y con frecuencia angular de w con el fin de que la señal que se obtiene esté demodulada para recuperar la información que es transportada en la onda portadora de la señal $y(t)$. Los bloques siguientes corresponden al de la ganancia k y al del integrador, que van multiplicados por la señal demodulada; la salida después del integrador es sumada a la misma señal $A \text{sen}(wt)$ que se generó anteriormente con el fin de modular la información o en su efecto la señal correspondiente a la tasa de dilución que entra a la planta. La idea de utilizar una señal sinusoidal es demodular y volver a modular la información de entrada y la salida, respectivamente. Es importante saber que a partir de la misma producción de biomasa al aplicarle el control la planta se realimenta con la tasa de dilución haciendo

que ésta controle los estados del sistema y podamos encontrar la máxima producción de las microalgas dentro del fotobiorreactor.

3.2 Implementación del controlador por búsqueda de extremos

En la implementación del control optimizante se consideró $S_{in} = 3 \text{ g}[N]/\text{m}^3$. La intensidad luminosa I se construyó a partir de ciclos de día y noche durante 50 días. El comportamiento de dicha entrada I es correspondiente a la intensidad con que los rayos solares llegan a las microalgas dentro del fotobiorreactor durante el período de iluminación comprendido en el ciclo de día. Notese entonces que en los ciclos de noche, los microorganismos no reciben ninguna Luz. La intensidad luminosa puede ser medida y sus unidades son expresadas en $(\mu\text{mol})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$. La figura 2 muestra el comportamiento de la intensidad luminosa utilizada en el modelo de crecimiento de microalgas.

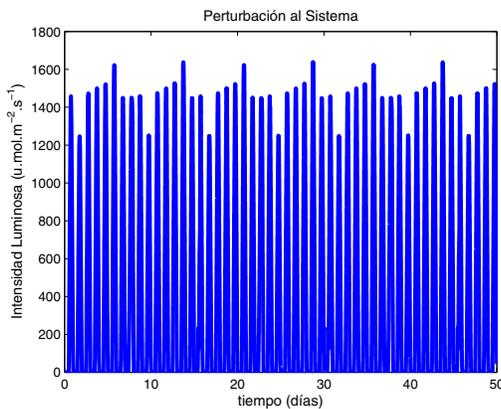


Fig. 2. Intensidad luminosa bajo un período de 50 días.

La tasa de dilución en lazo abierto tiene un valor constante $D = 0.35\text{d}^{-1}$. Las condiciones iniciales de los estados están representadas en el vector $[s_0, q_{n0}, x_0, q_{l0}, I_0]^T = [1.3, 0.1, 0.2, 0.13, 2]^T$, en donde la biomasa inicial es $0.2\text{g}[C]\text{m}^{-3}$ indicando que hay sólo una cantidad mínima de microorganismos. En la tabla 2 se muestran los parámetros empleados para el controlador diseñado, obtenidos a partir de una estrategia de prueba y error.

Parámetro	Valor	Medida
w_h	$0.5 \text{ rad}\text{d}^{-1}$	Frecuencia de corte del filtro pasa altas
k	1	Ganancia del integrador
A	$0.01 \text{ g}[C]\text{m}^{-3}\text{d}^{-1}$	Amplitud de la señal moduladora/demoduladora
w	$0.08 \text{ rad}\text{d}^{-1}$	Frecuencia de la señal moduladora/demoduladora

Tab. 2. Parámetros del Controlador por Búsqueda de Extremos.

4. RESULTADOS

El modelo del proceso se simuló en lazo abierto durante un período de tiempo de 15 días. Claramente, con

una tasa de dilución de 0.35d^{-1} , como se muestra en la figura 3, se obtiene una producción de biomasa de aproximadamente $19.5\text{g}[C]\text{m}^{-3}\text{d}^{-1}$. El sistema en lazo cerrado calcula en línea aproximadamente el valor mximo de la tasa de dilución que es de 0.9d^{-1} y permite conseguir una producción máxima de biomasa de alrededor de $36\text{g}[C]\text{m}^{-3}\text{d}^{-1}$.

En la figura 3 y la figura 4 se muestran la tasa de dilución y la producción de biomasa respectivamente, para cuando la planta funciona a lazo abierto durante un tiempo hasta que en el sistema comienza la acción de control en lazo cerrado.

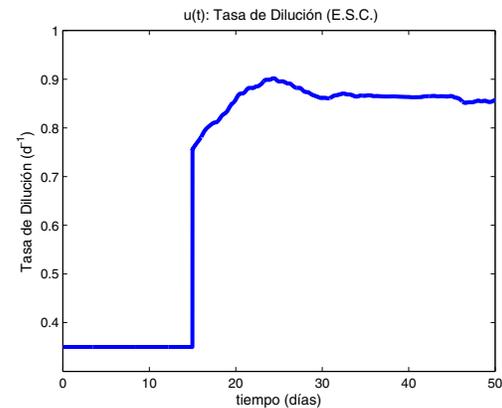


Fig. 3. Tasa de dilución en lazo abierto (hasta 15 días) y lazo cerrado aplicando E.S.C. (para después del día 15).

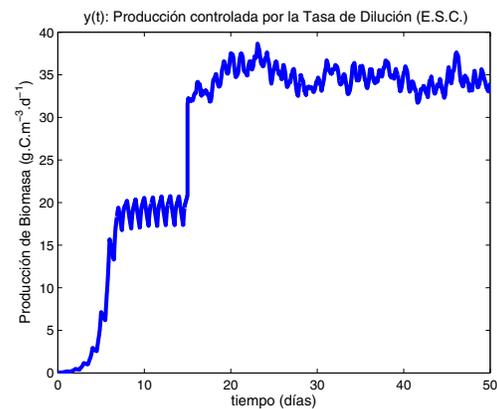


Fig. 4. Producción de biomasa en lazo abierto (hasta 15 días) y lazo cerrado aplicando E.S.C. (para después del día 15).

4.1 Prueba de Robustez

La primera prueba que se llevó a cabo consistió en incluir un ruido blanco en la concentración 'medida' de la biomasa y variar cinco parámetros a la vez en los que se

consideraba que podría haber sensibilidad porque habían sido hallados experimentalmente durante el desarrollo del modelo presentado en (Mairet et al. (2011a)). El ruido blanco generado consiste en una variación del 20% que puede tener la ‘medida’ de la biomasa, suponiendo que el sensor con el que se mide esta variable no es tan bueno. Para la prueba de sensibilidad, se consideró el conjunto de parámetros $P_0 = [\tilde{\mu}, K_{sI}^*, K_{iI}, K_s, \phi_{max}]$. A continuación se construyó un conjunto de vectores P_S usando el método *Latin Hypercube*. Se consideraron valores entre -25% y 25% , para generar la matriz P_S de dimensiones n por p , donde dicha matriz contiene una muestra del hipercubo latino (las 30 muestras más significativas de todas las posibles combinaciones con 5 variables), especificando que n son los valores (muestras) en cada una de las p variables. Las 30 muestras están distribuidas aleatoriamente en diferentes niveles para generar 30 simulaciones con cada vector de muestras de las 5 variables. En la figura 5 se observa en lazo cerrado la producción de biomasa con *E.S.C* realizando la variación de parámetros en el modelo.

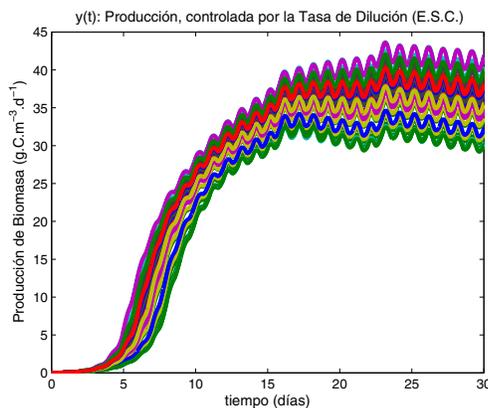


Fig. 5. Prueba de robustez realizando la variación de 5 parámetros con 30 muestras aleatorias para mostrar la producción de biomasa del sistema en lazo cerrado aplicando *E.S.C.*

El controlador por búsqueda de extremos fue probado mediante simulaciones en el modelo del fotobiorreactor de producción de microalgas, considerando cada uno de los elementos del conjunto de parámetros P_S y la salida medida con ruido. La productividad del fotobiorreactor no se vió alterada de manera significativa, comprobando así la robustez de la estrategia.

5. CONCLUSIONES

Este artículo muestra los resultados de un trabajo donde se buscó optimizar un proceso de producción de microalgas manipulando la tasa de dilución como variable de control de dicho proceso, en el que además se consideró como perturbación al sistema la intensidad luminosa. Con este desarrollo se pudo mostrar que en lazo cerrado la planta actúa en su máxima producción de forma casi

constante, mostrando que el controlador es robusto a este tipo de perturbaciones.

Además cuando el sistema empieza a operar en lazo cerrado, y toma medidas de biomasa adicionadas con un ruido blanco, el crecimiento de estos microorganismos no se ve afectado. Lo mismo pasa con la variación de los parámetros $\tilde{\mu}$, K_{sI}^* , K_{iI} , K_s y ϕ_{max} hasta un 25%, que aunque cada uno de estos parámetros varíe individualmente o en conjunto, el control sigue mostrando que es robusto, en este caso, a las incertidumbres del modelo.

Cabe resaltar de la figura 3 y la figura 4 que al estar la planta en lazo abierto y pasar a lazo cerrado hace que la tasa de dilución se incremente de 0.35 hasta 0.9 (d^{-1}) y consiga que la producción de biomasa se maximice desde un valor de 19.5 a 36 ($g[C]m^{-3}d^{-1}$) mostrando que se ha optimizado la función de interés.

BIBLIOGRAFÍA

- Ariyur, K.B. and Krstic, M. (2003). *Real-Time Optimization by Extremum-Seeking Control*. Wiley Interscience, New Jersey.
- Bayen, T., Mairet, F., Martinon, P., and Sebbah, M. (2013). Optimizing the anaerobic digestion of microalgae in a coupled process. *Eur. Control Conf. (France)*, 1218–1223.
- Deschenès, J.S. and Vande, A. (2015). Dynamic optimization of biomass productivity in continuous cultures of microalgae *isochrysis galbana* through modulation of the light intensity. 1–7.
- Fse, M. (2014). Aplicaciones de las microalgas: estado de la técnica. *AST Ingeniera S.L.*, 1–27.
- Guay, M. and Dochain, D. (2015). A time-varying extremum-seeking control approach. *Automatica*, 51, 356–363.
- Guay, M., Moshksar, E., and Dochain, D. (2015). A constrained extremum-seeking control approach. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 25(16), 3132–3153.
- Krstić, M. (2000). Performance improvement and limitations in extremum seeking control. *Systems & Control Letters*, 39(5), 313–326.
- Mairet, F., Bernard, O., Lacour, T., and Sciandra, A. (2011a). Modelling microalgae growth in nitrogen limited photobiorreactor for estimating biomass, carbohydrate and neutral lipid productivities. *Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy)*, 10591–10596.
- Mairet, F., Bernard, O., Masci, P., Lacour, T., and Sciandra, A. (2011b). Modelling neutral lipid production by the microalgae *isochrysis aff. galbana* under nitrogen limitation. *Bioresource Technology (France)*, 102, 142–149.
- Santo, A. (2014). Uso y aplicaciones potenciales de las microalgas. *Mecánica Y Electr.*, 1–27.