

CONTROL ADAPTATIVO LINEALIZANTE DE LA CONCENTRACIÓN DE
ETANOL PARA UN CULTIVO SEMICONTÍNUO DE LEVADURAS

LINEARIZING ADAPTIVE CONTROL OF ETHANOL CONCENTRATION FOR A
SEMI-CONTINUOUS YEAST CULTURE

Luz Suárez¹, Antioquía Galicia², y Carlos Lameda³

¹UPEL IPB, Barquisimeto. Email: luz_marina_suarez@hotmail.com

^{2,3}Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Vicerrectorado
Barquisimeto. Email: antioquiagalicia@gmail.com, lameda.carlos@gmail.com

Recibido: 15/03/16 Aceptado: 31/03/16

RESUMEN

La utilización de técnicas y estrategias de control avanzado constituye una opción para mejorar la calidad y la productividad de procesos en reactores biotecnológicos, como los de cultivos semicontínuos de levaduras. El control adaptativo es una herramienta útil, que responde a las características de no linealidad de dichos procesos, dada la dinámica de los parámetros cinéticos presentes en los mismos. Es por ello, que la presente investigación, de tipo proyectivo, tuvo como objetivo diseñar un sistema de control adaptativo linealizante para regular la concentración de etanol en un cultivo semicontínuo de levaduras a escala de laboratorio, con la utilización de cepas de la especie *Saccharomyces cerevisiae*. Para ello, se seleccionó un modelo matemático que describe el comportamiento del proceso; se utilizó un software para simular su comportamiento, y se ajustaron a las características de operación requeridas; se diseñó un sistema de control adaptativo utilizando un modelo sustentado en las técnicas de linealización por realimentación de estados y en la estimación en línea de las variables requeridas. Se pudo comprobar que el control adaptativo diseñado cumplió con los objetivos planteados y mostró robustez ante las perturbaciones ensayadas.

Palabras Claves: Control adaptativo, cultivo semicontínuo, levaduras.

SUMMARY

Using advanced control techniques and strategies is an option for improving the quality and productivity of processes in biotechnology reactors such as of cultures of yeasts. Adaptive control is a useful tool that responds to the characteristics of nonlinearity of such processes, given the dynamics of the kinetic parameters present in them. That is why this investigation, of a projective kind, aimed to design a linearizing adaptive control system to regulate the concentration of ethanol in a semi-continuous yeast culture, for the production of yeast at a laboratory scale with the use of strains *Saccharomyces cerevisiae* species. For this, a mathematical model describing the behavior of the process was chosen; software was used to simulate its behavior, and adjusted to the required operating characteristics; an adaptive control system using a model based on feedback linearization techniques for state feedback and online estimation of the required variables was designed. It was found that the

adaptive control complied with the objectives, and showed robustness to the disturbances tested.

Keywords: Adaptive control, semicontinuous culture, yeast.

INTRODUCCIÓN

Los procesos biotecnológicos, tales como los llevados a cabo en biorreactores de tipo semicontinuo, y en particular aquellos donde el cultivo está conformado por cepas del microorganismo *Saccharomyces cerevisiae*, han motivado el desarrollo de diversas investigaciones, dada la importancia de este tipo de estudios, especialmente para la industria de alimentos. Las estrategias de control convencional no proporcionan resultados satisfactorios al ser aplicadas en este tipo de procesos, por lo que se deben aplicar estrategias de control avanzado (Galicia, 2013).

El trabajo desarrollado en la presente investigación consiste en el diseño de un sistema de control adaptativo linealizante de la concentración de etanol para un cultivo semicontinuo de levaduras, utilizando las cepas de la especie *Saccharomyces cerevisiae*. Como un aporte de investigación, se propone que el sistema de control adaptativo diseñado permita regular la concentración de etanol a niveles bajos en un proceso de cultivo semicontinuo de levaduras, con robustez ante cambios dinámicos y perturbaciones en el proceso.

En el contexto del control automático el término adaptativo, está referido a la facultad de cambiar el comportamiento o parámetros del control en respuesta a cambios en las circunstancias del sistema controlado. Se considera que un regulador adaptativo es aquel que puede modificar su comportamiento en respuesta a cambios en la dinámica del sistema y/o en las perturbaciones a las que se ve sometido dicho sistema. Según Aström y Wittenmark (2008), un sistema de control adaptativo puede considerarse que tiene dos lazos: un lazo es el normal de realimentación con el proceso y el controlador. El otro es el lazo de ajuste de parámetros. El lazo de ajuste de parámetros es a menudo más lento que el

lazo normal de realimentación.

El control adaptativo linealizante, es una técnica de control fundamentada en geometría diferencial que permite resolver problemas de control aplicado a sistemas no lineales. Una de las metodologías utilizadas en el control adaptativo linealizante, es el diseño de un control por realimentación de estado, que origina un comportamiento lineal del sistema no lineal, en un ciclo de operación determinado. En este sentido, la característica de adaptación está referida a la estimación en línea de los parámetros variantes en el tiempo requeridos por el proceso.

En el caso de reactores biológicos con operación semicontinua, se persigue la regulación de las variables de estado a través de la manipulación del caudal de alimentación o de manera indirecta a través de la velocidad de dilución. En este sentido se utilizará la velocidad de dilución D , como acción de control, asumiéndose que los coeficientes de rendimiento se desconocen, las velocidades de reacción son desconocidas, y que los vectores de velocidad de alimentación del sustrato F y Q y la velocidad de dilución son conocidas. La velocidad de alimentación en forma líquida es escrita como $F=DS_e$, siendo S_e el vector de las concentraciones del sustrato de alimentación. El objetivo es regular la concentración de etanol, E , en un punto de ajuste E_{ref} , mediante la manipulación de la velocidad de dilución D .

Dadas las incertidumbres del modelo producto de las simplificaciones, de manera general es necesario la adopción de una versión adaptativa de la ley de control, con la finalidad de desprestigiar aquellas dinámicas del proceso por la reducción del orden del modelo. Esta ley de control viene dada entonces por:

$$D = \frac{\hat{\lambda}_1(E_{ref} - E) + \hat{\theta}_1 CTR + \hat{\theta}_2 OTR}{\hat{\theta}_3 S_e - E}$$
$$\cancel{D} = \frac{\hat{\lambda}_1(E_{ref} - E) + \hat{\theta}_1 CTR + \hat{\theta}_2 OTR}{\hat{\theta}_3 S_e - E}$$

Código de campo cambiado

(1)

Donde OTR es la velocidad de transferencia de oxígeno en fase gaseosa para la fase líquida, y CTR es la velocidad de transferencia de dióxido de carbono de la fase líquida para la fase gaseosa. En este caso los parámetros a estimar son θ_2 y θ_3 ya que se utilizará el modelo de reducción basado en la glucosa y el oxígeno.

La ley de adaptación presentada impone una dinámica de segundo orden para la convergencia del error de estimación θ caracterizada por los parámetros conocidos: período natural de oscilación τ y coeficiente de amortiguamiento ζ . Una versión discretizada de la adaptación de los parámetros θ_2 y θ_3 para un estimador de segundo orden, con T como periodo de muestreo y E^* como valor de referencia de la concentración de etanol, para $k \geq 0$, está dada por:

$$\hat{\theta}_{2,k+1} = \theta_{2,k} + \frac{T(E^* - E_k)}{OTR_k \tau^2} \quad (2)$$

$$\hat{\theta}_{3,k+1} = \theta_{3,k} + \frac{T(E^* - E_k)}{D_k S_e \tau^2} \quad (3)$$

Para lo cual la ganancia del controlador se calcula como:

$$\lambda_1 = 2 \frac{\zeta}{\tau} - \frac{(OTR_k - OTR_{k-1})}{TOTR_k \tau^2} \quad (4)$$

METODOLOGÍA

La unidad de estudio corresponde a un proceso de cultivo semicontinuo, para la producción de levaduras a escala de laboratorio, con la utilización de cepas de la especie *Saccharomyces cerevisiae*. La investigación que se propone es de tipo *proyectiva* (Hurtado, 2012, pp. 567-569). Se seleccionó un proceso conocido, presentado por primera vez en Soares (1997), y modelado en Crespo (2010). Se diseñó un controlador adaptativo linealizante para regular la velocidad de concentración de etanol en dicho proceso. Se

simuló y validó el funcionamiento del sistema de control adaptativo diseñado.

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para la simulación del comportamiento del modelo de proceso seleccionado se utilizó una función que representa las ecuaciones y parámetros del sistema, y una función S de Simulink, desarrollada por Crespo (2010) y Crespo *et al.* (2010). Las corridas simulan 20 horas de operación, partiendo de un volumen de 2 litros, y con un flujo constante de 0.12 g/l.

El diseño de este controlador se realizó con la ayuda de la herramienta de Matlab, (The MathWorks Inc., 2010). Para ello se consideró la información presentada por Bastin (1991), Chen y otros (1995), así como Aström y Wittenmark (2008) acerca del control adaptativo.

Se diseñó un control adaptativo de forma que el error de convergencia entre la variable controlada y el valor de referencia disminuya durante el proceso, para producir un flujo de alimentación que se adapte para mantener la concentración de etanol a un valor constante pequeño ($E_{ref} = 0.5$ g/l). Este valor de concentración de etanol permite un buen rendimiento de la levadura, evitando periodos muy largos de adaptación de la misma durante su uso. Se utilizó el modelo parcial para el diseño del controlador, así como para la estimación de los parámetros θ_2 y θ_3 , correspondientes a los regímenes respirativo-fermentativo y respirativo en función de la velocidad de alimentación de glucosa y la velocidad de transferencia de oxígeno, considerando el estimador de 2º orden propuesto por Chen y otros (1995). Se diseñó un controlador adaptativo con θ_2 y θ_3 constantes, en el que la ley de control diseñada corresponde a lo indicado en la ecuación (1) y la ganancia se calcula de acuerdo con la ecuación (4).

La Figura 1 muestra el diagrama del sistema de control implementado utilizando el SIMULINK, considerando constantes a θ_2 y θ_3 , un sustrato de alimentación de 30 g/l,

para una concentración de etanol de 0,5 g/l. La ganancia del controlador se considera constante.

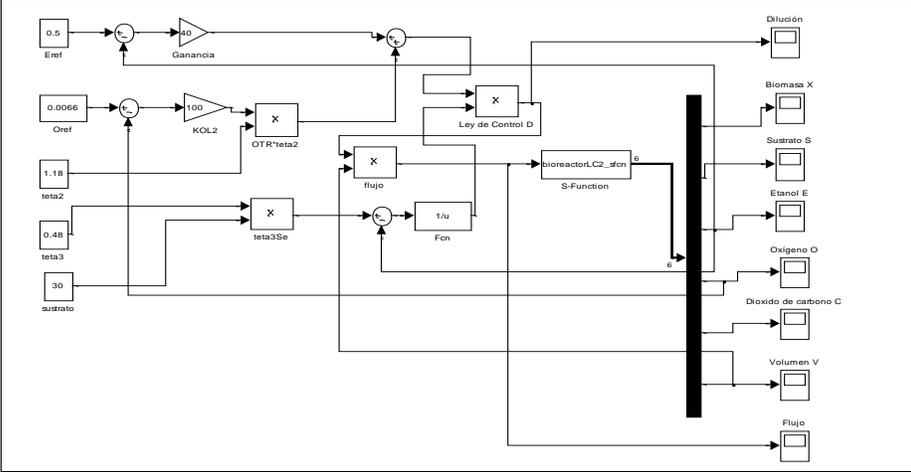


Figura 1. Diagrama del Sistema de Control Adaptativo del Biorreactor con θ_2 y θ_3 constantes.

La Figura 2 muestra el comportamiento de la concentración de etanol en el sistema controlado.

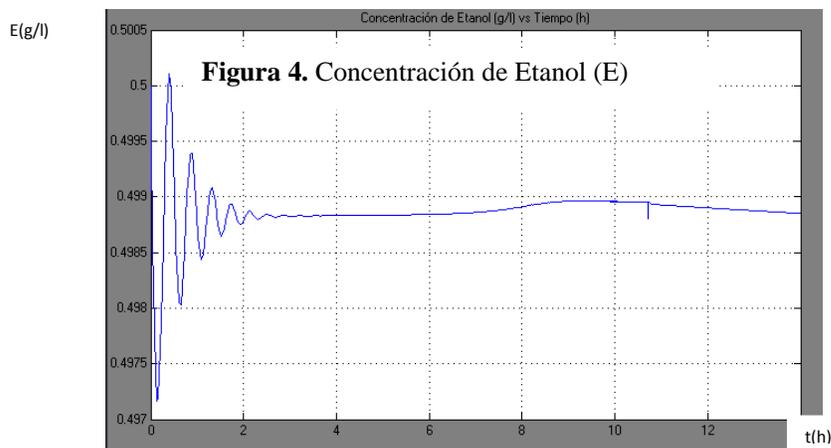


Figura 2. Comportamiento de la concentración de etanol en el sistema controlado

Se observa en la Figura 2 correspondiente a los resultados obtenidos con el controlador adaptativo, que en las primeras 2 horas existe una oscilación en la señal correspondiente a Concentración de Etanol, con una máxima desviación aproximadamente a la media hora de iniciado el proceso. Entre las 3 y 5 horas se mantiene más o menos estable en aproximadamente 0.4987 g/l, y a las 9 horas alcanza el valor de 0,499 g/l. Luego de las 10 horas, baja nuevamente hasta 0.4987 y se mantiene así hasta las 14 horas. El error es de unos 0,001 g/l.

Para evaluar el desempeño del controlador, ante la presencia de perturbaciones, se realizaron alteraciones al valor de referencia en un orden de +/-10% de 0,5 g/l de la concentración de etanol, lo que corresponde a 0,45 g/l y 0,55g/l. Del mismo modo, se efectuaron alteraciones en el sustrato de alimentación, para $S_e= 20$ g/l y $S_e= 40$ g/l. Se pudo determinar que se recuperaba en forma efectiva, y que el error final en la concentración de etanol fue de aproximadamente 1%.

CONCLUSIONES

Sobre la base de los resultados alcanzados y atendiendo a los objetivos de la investigación se concluye que:

1. El control adaptativo linealizante diseñado cumple con los requerimientos del proceso, lo cual se demostró a través de la simulación. Se deriva del diseño planteado y en atención a los resultados obtenidos de la simulación, que la acción de control representada en este caso por la dilución, es efectiva dado que se alcanza el objetivo de control, como lo es mantener la concentración de etanol, en un valor cercano a la referencia de 0,5 g/l.
2. El control adaptativo linealizante obtenido muestra robustez ante las perturbaciones ensayadas, relativas a la alteración del sustrato de alimentación y del valor de referencia de la concentración de etanol.

Dada la importancia de mantener y continuar desarrollando investigaciones en el área objeto de estudio, se recomienda lo siguiente:

1. Implantar la investigación realizada en un biorreactor a escala de laboratorio, lo cual permitiría profundizar la investigación y emprender el desarrollo de nuevas investigaciones en el área.
2. Probar otras técnicas y estrategias avanzadas de control, tales como el control neurodifuso, o combinación de control adaptativo y predictivo, para automatizar y optimizar procesos de cultivo de levaduras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aström, K. y Wittenmark, B. 2008. Adaptive Control. Dover Publications.
- Bastin, G. 1991. Nonlinear and Adaptive Control in Biotechnology: A Tutorial. *Proc. 1st European Control Conference*, Hermès, Grenoble, pp. 2001-2012.
- Chen, L., Bastin, G. y Van Breugesem, V. 1995. A Case Study of Adaptive Nonlinear Regulation of Fed-batch Biological Reactors. *Automatica*, 31(1): 55-65.

- Crespo, Ll. 2010. Sistema de Control Difuso para la Alimentación de Sustrato en un Cultivo Semicontinuo de Levaduras. Trabajo de Grado de Maestría. UNEXPO, Barquisimeto. 99 pp.
- Crespo, Ll., Cravo, G., Lameda, C. 2010. Sistema de Control Difuso para la Alimentación de Sustrato en un Cultivo Semicontinuo de Levaduras. *In* Kaschel, H. Anales del VII Congreso Latinoamericano de Control Automático. Universidad de Santiago de Chile, Asociación Chilena de Control Automático, IEEE, IFAC, Santiago de Chile. Pp. 365-370
- Galicia, A. 2013. Control Robusto de la Concentración de Etanol en un Proceso de Cultivo Semicontinuo de Levaduras. Trabajo de Grado de Maestría. UNEXPO, Barquisimeto. 82 pp.
- Hurtado, J. 2012. Metodología de la investigación: guía para una comprensión holística de la ciencia. Cuarta Edición. Ediciones Quirón, Caracas.
- Renard, F., Vande Wouwer, A. y Perrier, M. 2006. Robust Adaptive Control of Yeast Fed-batch Cultures. IFAC, International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes (ADCHEM 2006), Brasil, pp. 189-194.
- Rodríguez, D y Bordóns, C. 2005. Apuntes de Ingeniería de Control. En <http://www.esi2.us.es/~danirr/apuntesIC4.pdf> [Consulta: febrero 10, 2016].
- Soares, F. 1997. “Monitorização e controlo de fermentadores – Aplicação ao fermento de padeiro”, *PhD Thesis*, Universidade do Porto. 356 pp.
- The MathWorks Inc. 2010. Simulink Users Guide. The MathWorks Inc., Natick, USA. 1616 pp.