



Identificación y sintonía de un controlador PID para el proceso de oxígeno disuelto en un fermentador

Greta Marchante González, Dayana Piedra Puerta, Yusmeily de la Caridad Díaz Puebla, Ana Isabel González Santos

RESUMEN / ABSTRACT

En el presente trabajo el objeto tecnológico lo constituye el fermentador R1 de la planta de EPOVAC del Centro de Inmunología Molecular; en el cual se realiza la fermentación continua de células de animales por técnicas de perfusión. El objetivo general de la investigación es solucionar los problemas de desajustes del controlador PID del lazo del porcentaje de oxígeno disuelto a través del diseño de un sistema automatizado para el control de esta variable. Mediante técnicas de identificación experimental de sistemas se obtiene el modelo matemático de la dinámica del porcentaje de oxígeno disuelto y para los fines de control fue propuesto un algoritmo PID.

Palabras claves: fermentación, porcentaje de oxígeno disuelto, sistema automatizado e identificación experimental.

In this paper the technology object constitutes the fermenter R1 of the EPOVAC production plant of the Molecular Immunology Center; in which continuous fermentation of animal cells by perfusion techniques is performed. The overall objective of the research is to solve the problems of PID loop controller of the percent of dissolved oxygen through the design of automatic control system for this variable. Using experimental techniques by identifying the mathematical model of dynamics percent of dissolved oxygen is obtained. It was decided to use PID algorithms to resolve the problems in this loop.

Key words: *fermentation, percent of dissolved oxygen, automated system and identifying.*

Título en Inglés

Automated system for controlling percent of dissolved oxygen in a fermenter.

INTRODUCCIÓN

En Cuba existen diversas industrias biotecnológicas, mostrando importantes avances en las líneas de investigación básicas sobre la inmunoterapia del cáncer, la que permite encaminar la acción del sistema inmune o alguno de sus componentes al tratamiento de enfermedades, y es una de las líneas donde se pone mayor énfasis, específicamente en el desarrollo de fármacos y vacunas [1].

Los productos comercializados por el Centro de Inmunología Molecular (CIM) como es el caso del Ingrediente Farmacéutico Activo (IFA) de varias vacunas, se basan en la fermentación continua de células animales, y se producen en las plantas de fermentación del propio centro con fermentadores en su mayoría del fabricante Bioengineering [2]. El proceso de fermentación que se estudia cuenta con un biorreactor de este fabricante de acero inoxidable con 1500 L de capacidad neta, de los cuales se usan 1000 L para el proceso productivo, o sea volumen efectivo, es de tipo vaso-camiseta, posee un vaso interior y una chaqueta alrededor de este que permite controlar la temperatura del cultivo. En estos procesos se controlan varias variables físicas y químicas como son: la temperatura, presión, nivel en el vaso, velocidad de agitación, nivel de oxígeno disuelto (O_2), pH, nivel de espuma, entre otras, y está equipado de toda la instrumentación necesaria para su funcionamiento automático, controlado a través de un autómat (PLC) de Siemens de la serie S7-300 y un sistema SCADA del fabricante PARAGON.

El buen estado de estas plantas es un requisito clave para poder alcanzar los niveles de calidad requeridos en la obtención de estos biofármacos, debido a esto resulta de vital importancia lograr que estos procesos tengan un nivel alto de automatización, con sistemas capaces de controlar los distintos procesos de forma eficiente y de mantener las variables fundamentales dentro de los rangos establecidos.

Generalidades del oxígeno disuelto

El oxígeno es indispensable para la vida. El éxito de los organismos aerobios reside en el hecho de que gracias al oxígeno pueden extraer más energía de los alimentos que los organismos anaerobios, mediante procesos que se dan en el interior de la célula y que se conocen como beta-oxidación, glucólisis, ciclo de Krebs y respiración celular. Estos procesos permiten la liberación de toda la energía contenida en los alimentos; así, las células canalizan la energía extraída de los nutrientes hacia ciertas moléculas que se utilizan en la síntesis posterior de macromoléculas.

El oxígeno disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno que está disuelta en algún fluido al que se le proporciona agitación. El nivel de OD puede ser un indicador de cuán contaminada está el agua y cuán bien puede dar soporte esta agua a la vida vegetal y animal.

La cantidad de oxígeno que puede disolverse en el agua, expresado normalmente en ppm (partes por millón) depende de la temperatura y la elevación del sitio donde se toma la muestra. El agua más fría puede guardar más oxígeno en ella que el agua caliente [3].

El oxígeno se disuelve poco en agua (y aún menos en caldos fermentados) y es relativamente escaso en el aire (20,8 %). La transferencia de oxígeno usualmente se facilita por la agitación que se requiere también para mezclar los nutrientes y mantener la fermentación homogénea. Sin embargo, existen límites para la velocidad de agitación, debido tanto al alto consumo de energía, como al daño ocasionado a los organismos por un esfuerzo de corte excesivo.

El oxígeno para ser metabolizado por el microorganismo debe pasar a través de una serie de resistencias al transporte, dependiendo de la hidrodinámica de la burbuja, temperatura, actividad celular y densidad, composición de la solución, fenómeno interfacial y otros factores. En la figura 1 se muestra el esquema de transporte de oxígeno al interior de la célula donde las resistencias involucradas desde el interior de la burbuja de gas hasta el lugar de reacción [4] son:

1. Difusión desde el seno o núcleo del gas a la interfaz gas – líquido.
2. Movimiento a través de la interfaz gas – líquido.
3. Difusión del soluto a través de la región estancada adyacente a la burbuja.
4. Transporte del soluto a través del seno del fluido líquido.
5. Movimiento a través de la segunda región estancada asociada con la célula.
6. Transporte difusivo hacia el interior de la célula.
7. Difusión a través del sólido hasta cada célula individual (si las células están en un agregado o partícula sólida).
8. Transporte a través del citoplasma hasta el lugar de reacción.

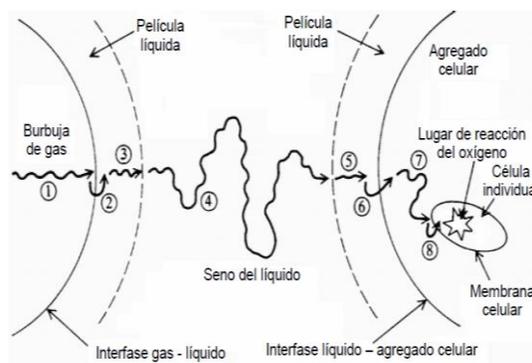


Figura 1
Esquema del transporte de oxígeno desde una burbuja de gas al interior de la célula.

Muchos factores influyen en la demanda de oxígeno, siendo los más importantes la especie celular utilizada, la fase de crecimiento del cultivo y la naturaleza de la fuente de carbono en el medio [5].

El suministro de oxígeno para cualquier proceso de fermentación se realiza adicionando aire de manera continua y oxígeno puro en caso de que sea necesario para lograr un porcentaje adecuado de oxígeno disuelto en el medio líquido.

El consumo de oxígeno en los reactores biológicos está dado por el número de microorganismos existentes en el fermentador en un momento determinado y por su consumo unitario. Por lo tanto, está directamente relacionado con la población inicial en cada ciclo y el tiempo durante el cual, ésta población se encuentra en condiciones de desarrollarse [6].

La transferencia de oxígeno es de gran importancia en los procesos de fermentación aerobia. Por lo que es necesario disponer de métodos adecuados para la medida de parámetros de la transferencia gas líquido, áreas interfaciales específicas y distribuciones de tamaños de burbuja. Lo que se persigue en un biorreactor es intensificar el fenómeno de transferencia de oxígeno.

MATERIALES Y MÉTODOS

Fermentador R1 de la planta IFA de EPOVAC

En el fermentador R1 el método más utilizado para el suministro de oxígeno en el proceso de fermentación es la aireación del cultivo, manipulando los flujos de aire y oxígeno puro. El flujo de aire se mantiene constante en un valor fijado por el operador y el oxígeno puro es adicionado por orden del lazo de control del porcentaje de oxígeno disuelto. Estos gases son introducidos al vaso por burbujeo directo, a través del burbujeador (*sparger*), y las burbujas de aire y oxígeno son homogenizadas en todo el recipiente por el impelente. La frecuencia con que es suministrado el oxígeno está en correspondencia con la velocidad de consumo de oxígeno por el cultivo, OUR (*Oxygen Uptake Rate*).

El porcentaje de oxígeno disuelto en el fermentador R1 es medido por un electrodo de tipo polarográfico y transmitido al PLC, la acción de control calculada es enviada a los controladores de flujo másico que suministran el flujo de oxígeno y aire necesario al cultivo a través del burbujeador. Las estrategias de control de esta variable pueden cambiar en función de las técnicas de cultivo celular utilizadas. A continuación en la figura 2 se muestra el diagrama tecnológico del fermentador R1, haciendo referencia solamente al control del porcentaje de oxígeno disuelto.

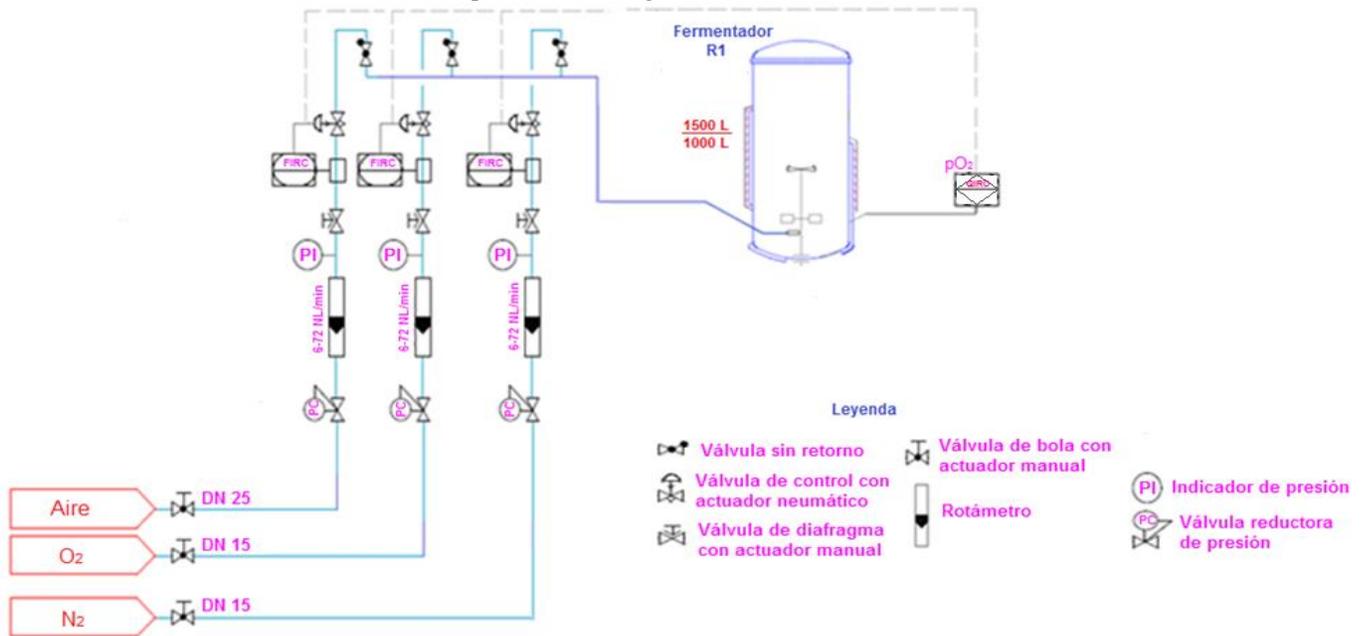


Figura 2
Diagrama tecnológico simplificado del fermentador R1.

Identificación del porcentaje de oxígeno disuelto

Con el objetivo de obtener la estructura y los parámetros del modelo matemático de esta variable se empleó la metodología representada en la figura 3 [7]:

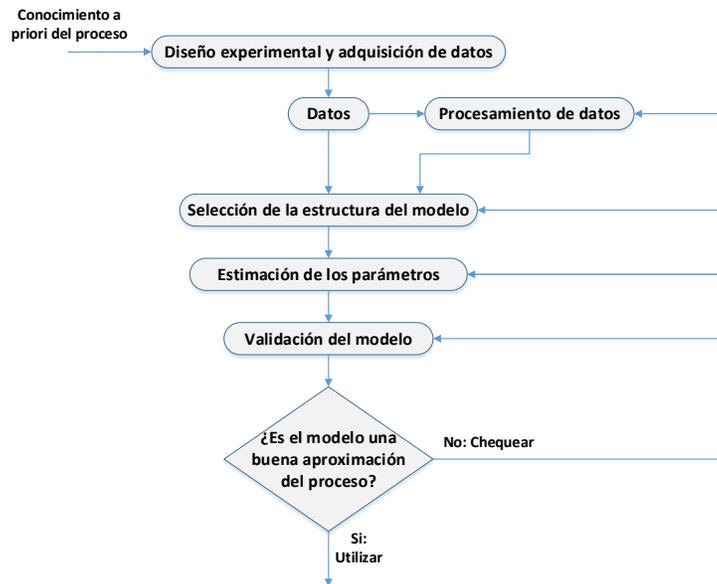


Figura 3
Metodología para la identificación de sistemas.

Diseño del experimento de identificación

Para utilizar debidamente los métodos de identificación es necesario, siempre que sea posible, diseñar adecuadamente el experimento. Para ello es necesario disponer de ciertos conocimientos básicos sobre el comportamiento del proceso, seleccionar la señal de excitación, el tiempo de muestreo, entre otras características [8].

Señal de excitación

Se determinó utilizar como señal de estímulo al sistema una secuencia multinivel pseudo-aleatoria (*Pseudo Random Multilevel Sequence*, PRMS). Las PRMS tienen en contraste a las PRBS (*Pseudo Random Binary Sequence*), no solamente dos niveles, sino varios. La ampliación del número de diferentes niveles en la señal de entrada permite una mejor excitación al sistema buscando una mayor persistencia y variación de la señal de estímulo al proceso. Además como el experimento se realizó en línea, no se le podían hacer alteraciones bruscas (por ejemplo una señal paso escalón) al flujo de oxígeno en este caso porque este provocaría la muerte celular, ya sea por exceso de oxígeno o por ausencia de este.

La señal aleatoria PRMS de tres niveles diseñada y utilizada para la identificación fue superpuesta sobre el valor de de 9 NL/min y para la validación sobre el valor de de 7 NL/min. Estas señales fueron aplicadas en línea al proceso y resultado de ello fueron adquiridas 1800 muestras (3600 segundos) en cada experimento que fue efectuado en días diferentes, tratando de no afectar sensiblemente al proceso. Se hicieron tres réplicas. Cada réplica tuvo 6 cambios en torno al valor base, escogiendo el período de conmutación del cambio en función de la dinámica que se estaba apreciando realmente en el proceso.

La señal utilizada para la identificación se aprecia en la figura 4a donde el nivel base es 9 y los otros dos niveles son 6 y 12, que significan el 40%, 60% y 80% de la señal de flujo de oxígeno, que tiene un rango de 0-15 NL/min. Esto se hace para garantizar que la señal aplicada en su totalidad aporte un flujo de oxígeno semejante al que aportaría el sistema de control si estuviera activado, solo que con otras fluctuaciones.

Para lograr estimular el proceso fue necesario pasar el controlador del flujo de oxígeno a forma manual, con lo cual queda anulado el efecto del controlador sobre el sistema. Luego se conecta un sistema de adquisición de datos (Fluke 744) en el que se configura previamente el tiempo de muestreo, la variable a adquirir y otros parámetros que garanticen la compatibilidad con la aplicación informática de vigilancia del fabricante Paragón. Este sistema se conecta en serie con el lazo del por ciento de oxígeno disuelto (%DO) para la recolección de los datos, y a través de la aplicación SCADA se va construyendo la señal de excitación. Al finalizar el experimento, se cambia el flujo de oxígeno a la configuración cascada como se opera normalmente.

Recolección y pretratamiento de los datos de entrada-salida

El tiempo de muestreo de los datos obtenidos a través del sistema de adquisición Fluke 744 fue de 2 segundos. Se seleccionó este período de forma empírica teniendo en cuenta la rapidez del proceso. Se obtuvo un total de 1800 muestras.

Antes de comenzar a trabajar con los datos se convirtieron los mismos a unidades de ingeniería a través de la fórmula (1) donde el % DO es el porcentaje de oxígeno disuelto en el fermentador R1 e I es la corriente eléctrica obtenida por el sistema de adquisición Fluke 744 en mA.

$$\%DO = 7.5 * (I - 4) \quad (1)$$

Las señales PRMS para la identificación y la validación se muestran en la parte superior de la figura 4. El porcentaje de oxígeno disuelto, variable de salida del modelo a obtener y resultado de la aplicación de estas señales de entrada, se muestra en la parte inferior de la figura 4.

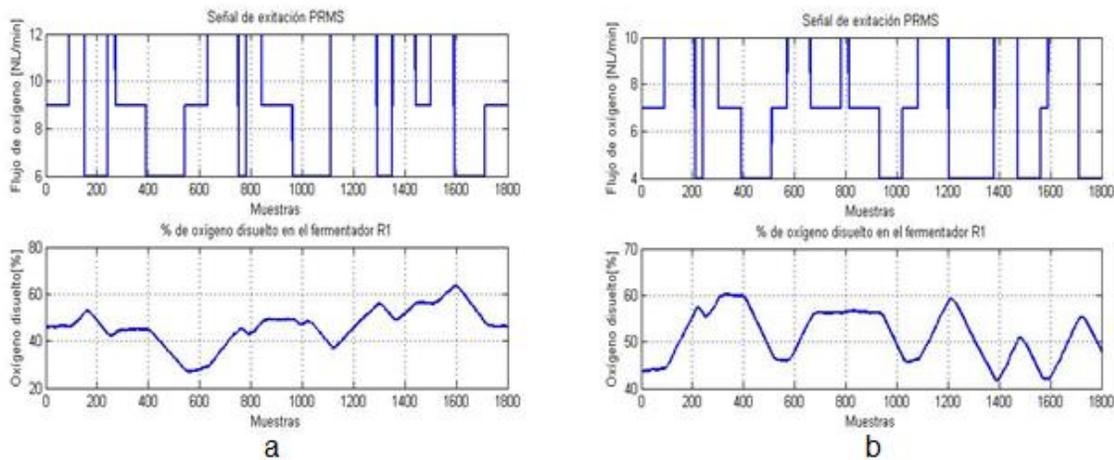


Figura 4

a-Señal PRMS utilizada para la identificación y salida del proceso, b- Señal PRMS utilizada para la validación y salida del proceso.

Análisis de las mediciones obtenidas

Para tener una visión cualitativa de los datos recolectados en el primer experimento, estos se someten a un análisis estadístico básico, con el propósito de comprobar si los mismos tienen un comportamiento adecuado, contienen información suficiente y son válidos para su utilización en la obtención de un buen modelo matemático que describa al proceso.

Tabla 1. Análisis estadístico de los datos del experimento.

Variable	Media	Desviación Estándar	Varianza	Mínimo	Máximo
% DO	46.14	8.02	64.25	26.99	63.53
Flujo de oxígeno[NL/min]	9.05	2.48	6.15	6	12

Los puntos del conjunto de datos que se encuentran alejados de su media a una distancia superior a la desviación estándar, son puntos alejados del resto de los datos aunque para determinarlos como datos malos (*outliers*) [9], usualmente se consideran aquellos puntos que se encuentran alejados a tres veces la desviación estándar o distancias superiores.

En este caso todos los datos se encuentran dentro del rango requerido por lo que no se considera la existencia de datos malos.

Análisis en el dominio de la frecuencia

Un factor indeseable que pudiera ocurrir durante la realización de las mediciones, es la presencia de ruido en los datos recolectados. Con el objetivo de conocer si existe ruido en las mediciones, se hace el análisis de los datos en el dominio de la frecuencia; para esto se recurre a la transformada rápida de Fourier, con la cual se puede determinar la amplitud y la frecuencia de la señal obtenida mediante la medición. El gráfico de densidad espectral obtenido se muestra en la figura 5.

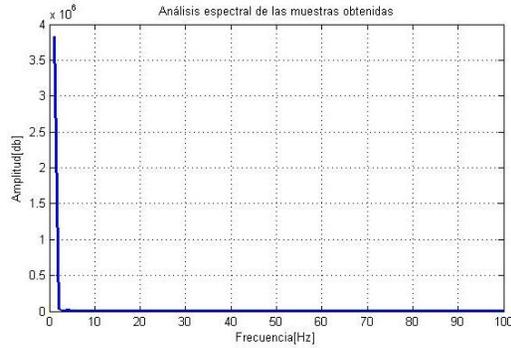


Figura 5
Densidad espectral de la señal de salida.

Como se puede observar en la gráfica, la señal de salida contiene toda su energía concentrada en las bajas frecuencias ya que no tiene picos en las medias o altas frecuencias. Por tanto se puede llegar a la conclusión de que no es necesario la aplicación de un filtro en la realización de las mediciones.

Análisis de autocorrelación y correlación cruzada

El análisis del período de muestreo se realiza mediante el uso de la función de autocorrelación, la cual no es más que la correlación de la señal de salida (y la señal de entrada) con ella misma desplazada en determinados instantes de tiempo [9,10]. Este análisis se hace para asegurar una correcta selección del tiempo de muestreo de forma tal que la pérdida de información sea lo menos posible y paralelamente evitar la existencia de información redundante en los datos recolectados. El resultado de la autocorrelación de la señal de salida y la señal de entrada se muestra en la figura 6a y la figura 6b respectivamente.

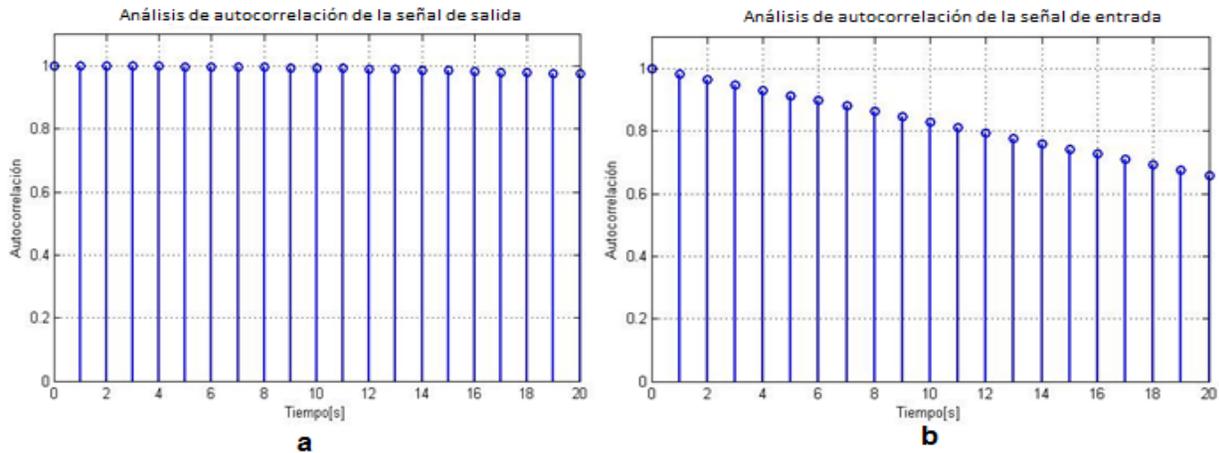


Figura 6
a-Autocorrelación de la señal de salida, b- Autocorrelación de la señal de entrada.

Como se puede apreciar el valor de autocorrelación en las primeras 11 muestras en ambas señales se encuentra por encima de 0.8 (80% del valor máximo), lo que demuestra que las señales tienen una buena correlación consigo mismas y por tanto no hay pérdida de información. Es por ello que se puede decir que el período de muestreo escogido permite recoger la información necesaria del proceso para estudiar su comportamiento dinámico.

La función de correlación cruzada contiene información acerca de las propiedades dinámicas del sistema, es una función impar y permite detectar retardos [10]. Una correlación cruzada negativa indica una relación inversa entre ambas señales. El valor máximo de la correlación cruzada es el punto que permite detectar el retardo entre ambas señales. En la figura 7 se muestra que hay un retardo de 14 unidades.

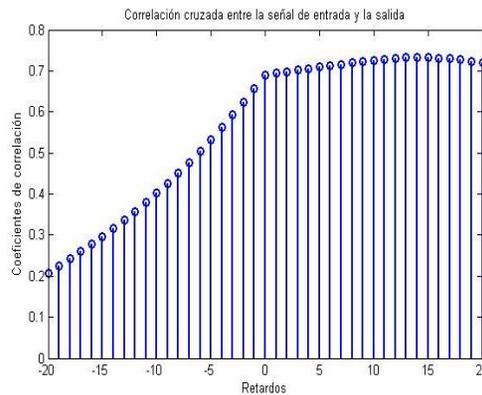


Figura 7
Correlación cruzada entre la entrada y la salida del sistema.

Selección de la estructura del modelo

Con el objetivo de obtener un modelo matemático que describa el comportamiento dinámico del proceso de variación del porcentaje de oxígeno disuelto en el interior del fermentador, y teniendo en cuenta que solo se dispone de la información recopilada durante el proceso de identificación, se utilizó la herramienta *System Identification Tool* de la caja de herramientas de MATLAB® [11] (*'ident'*). Esta herramienta simplifica el trabajo en gran medida ya que por métodos de estimación y optimización incluidos en la programación de dicho software es capaz de obtener un modelo sencillo y que se corresponda con la dinámica del sistema bajo estudio. Para obtener dicho modelo es necesario realizar varias pruebas con diferentes estructuras de modelos; al final, el modelo que más se corresponda con la dinámica del proceso es el modelo que describirá el comportamiento temporal de dicho proceso. El modelo resultante, fue el utilizado en la etapa de diseño del sistema de control y ajuste de los parámetros del controlador. En esta investigación fueron seleccionadas cuatro estructuras diferentes de modelo: ARX (*Autoregressive Exogenous*), ARMAX (*Autoregressive Moving Average Exogenous*), BJ (*Box-Jenkins*) y OE (*Output-Error*), mostradas en las ecuaciones (2), (3), (4) y (5) respectivamente [12].

$$y(t) = \frac{B(q)}{A(q)} q^{-k} u(t) + \frac{1}{A(q)} e(t) \quad (2)$$

$$y(t) = \frac{B(q)}{A(q)} q^{-k} u(t) + \frac{C(q)}{A(q)} e(t) \quad (3)$$

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} q^{-k} u(t) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t) \quad (4)$$

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} q^{-k} u(t) + e(t) \quad (5)$$

Estimación de los parámetros

Estimación de los modelos ARX, ARMAX, BJ y OE

Como no se sabe el orden del sistema, o sea, la cantidad de ceros y polos del mismo, se estimaron varios modelos ARX dentro de un rango de valores del 1 al 10 para luego escoger los valores que brindan la mejor estimación del modelo para éste y las restantes estructuras. A partir de estos resultados se estimaron los modelos ARMAX, BJ y OE (figura 8). Durante esta etapa de la identificación, los modelos con cualquiera de las estructuras en el dominio continuo mostraron porcentajes de ajustes negativos y predicciones erróneas lo cual motivó el trabajo con modelos discretos con estas mismas estructuras. Los resultados fueron correctos y los autores atribuyen estos errores a problemas de simulación y estabilidad numérica.

Análisis de la correlación cruzada y de la autocorrelación de los residuos

El residuo está dado por la diferencia entre la salida real y la estimada. Un buen modelo contiene la auto-correlación del residuo dentro del intervalo de confianza del modelo, indicando que los residuos no están correlacionados. Un buen modelo tiene sus residuos no correlacionados con las entradas pasadas. Si hubiese correlación indica que el modelo no es capaz de

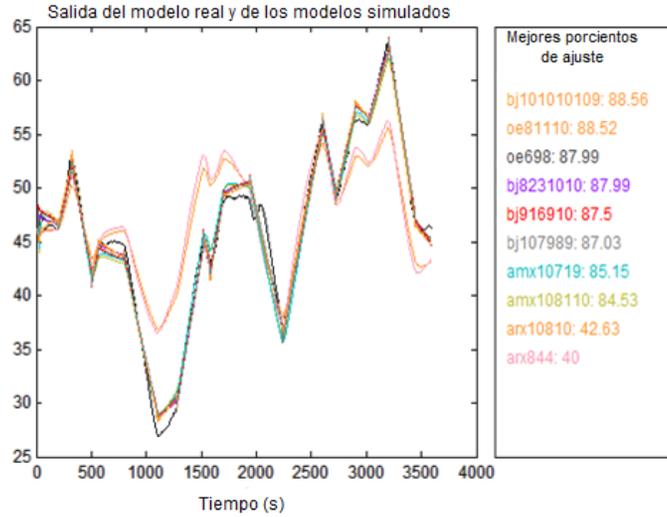


Figura 8
Salida del sistema real y de los diferentes modelos obtenidos.

describir parte de su salida correspondiente a esa determinada entrada pasada. Por ejemplo, un pico fuera del intervalo de confianza para el retardo k significa que la salida $y(t)$ que ha sido originada por la entrada $u(t-k)$ no es descrita apropiadamente por el modelo. En la figura 9 se encuentran los resultados obtenidos para este análisis.

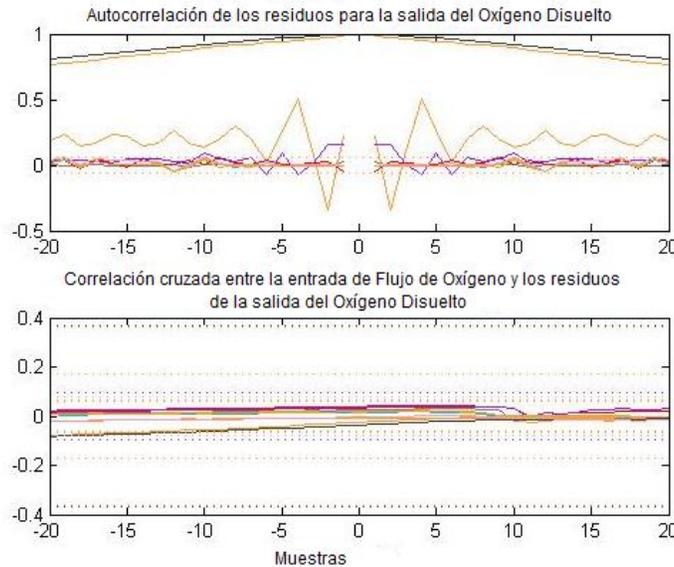


Figura 9
Autocorrelación de los residuos y correlación cruzada de los modelos ARX, ARMAX, BJ y OE.

A pesar de que los cuatro primeros modelos de la figura 8 (bj101010109, oe81110, oe698, bj8231010) poseen un buen porcentaje de ajuste y la correlación cruzada tiene un buen comportamiento, la autocorrelación de los residuos se encuentra fuera del intervalo de confianza, indicando que los mismos están correlacionados, por lo que estos modelos no son capaces de describir correctamente la salida del sistema para una determinada entrada pasada. El resto de los modelos tienen un comportamiento aceptable pues la correlación cruzada y la autocorrelación de los residuos se encuentran dentro de los límites establecidos. La estructura seleccionada para ser utilizada posteriormente en el diseño y ajuste del controlador fue la estructura ARMAX formalizada en (3) con los órdenes $n_a=10$, $n_b=7$, $n_c=1$ y $n_k=9$. En cada estructura analizada y también dentro de la estructura ARMAX fueron modificados los órdenes de los polinomios que aparecen en el modelo. Estos órdenes seleccionados en esta estructura garantizan la estabilidad y un porcentaje de ajuste favorable a la captura de la dinámica del modelo.

Las estructuras Box-Jenkins también mostradas en la figura 8, superiores en cuanto al porcentaje de ajuste (fit) y a pesar de

que cumplen con los parámetros antes descrito, tienen alguno de sus polos fuera del círculo unitario haciendo al sistema inestable. El porcentaje de ajuste fue de 85.15%, capaz de capturar la dinámica del proceso. La función que caracteriza dicho modelo (ver ecuación 3) está dada por las expresiones (6), (7) y (8).

$$A(q) = 1 - 2.972 + 3.248 q^{-2} - 1.667q^{-3} + 0.4637q^{-4} - 0.1362 q^{-5} + 0.2065q^{-6} - 0.2415q^{-7} + 0.08314q^{-8} + 0.06284q^{-9} - 0.04765q^{-10} \quad (6)$$

$$B(q) = 0.005776 q^{-9} - 0.004995 q^{-10} - 0.001061q^{-11} + 0.001965q^{-12} - 0.003715q^{-13} + 0.001116q^{-14} + 0.0009192q^{-15} \quad (7)$$

$$C(q) = 1 - 0.9985 q^{-1} \quad (8)$$

El sistema expresado como función transferencial en tiempo continuo teniendo en cuenta el canal de medición y el de perturbación, se muestra en las ecuaciones (9) y (10).

$$Gp(s) = \frac{0.0008397 s^9 + 0.003109 s^8 + 0.006259 s^7 + 0.00787 s^6 + 0.006633 s^5 + 0.003992 s^4 + 0.001696 s^3 + 0.0003911 s^2 + 0.00003068s + 0.0000000134}{s^{10} + 1.522 s^9 + 2.968 s^8 + 2.541 s^7 + 1.904 s^6 + 0.873 s^5 + 0.2584 s^4 + 0.0481 s^3 + 0.001725 s^2 + 0.000002249 s + 0.000000002657} * e^{-18s} \quad (9)$$

$$Gpert(s) = \frac{0.93074 s^{10} + 0.07064 s^9 + 0.1351 s^8 + 0.1586 s^7 + 0.1389 s^6 + 0.08771 s^5 + 0.0393 s^4 + 0.01202 s^3 + 0.02224 s^2 + 0.0001896 s + 0.0000001438}{s^{10} + 1.522 s^9 + 2.968 s^8 + 2.541 s^7 + 1.904 s^6 + 0.873 s^5 + 0.2584 s^4 + 0.0481 s^3 + 0.001725 s^2 + 0.000002249 s + 0.000000002657} \quad (10)$$

Validación del modelo del porcentaje de oxígeno disuelto

A continuación se lleva a cabo el proceso de validación teniendo en cuenta las limitaciones de los métodos de identificación y los objetivos finales a partir de los cuales fue concebido. A menudo es imposible, costoso o peligroso probar todos los posibles modelos con el uso que se ha previsto. Por ello, la confianza en el modelo debe verificarse de otras maneras.

Análisis de la estabilidad mediante polos y ceros del modelo

Este criterio plantea que los polos del modelo deben de estar en el semiplano izquierdo del plano S si el modelo está representado en tiempo continuo, o en el interior de la circunferencia unitaria en caso de que sea discreto, para garantizar que el sistema sea estable. Esto se puede apreciar en la figura 10a y 10b respectivamente.

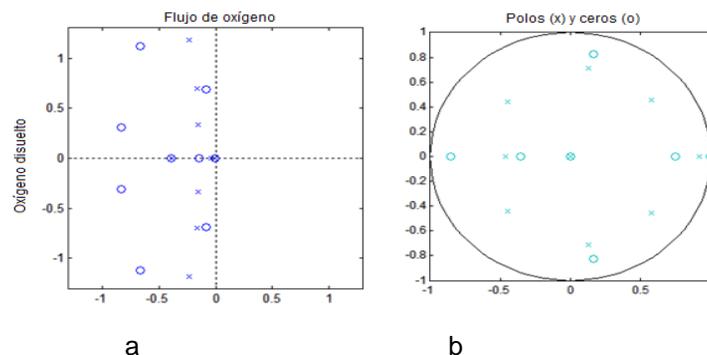


Figura 10
Diagrama de polos y ceros del modelo representado en: a) forma continua, b) forma discreta.

Como se puede apreciar en la figura 10 el modelo es válido pues la ubicación de los polos cumple con el criterio mencionado anteriormente y se puede llegar a la conclusión de que el sistema es estable y de fase mínima.

La presencia de ceros y polos que prácticamente se cancelan informa sobre la posibilidad de reducir el orden de los polinomios B y A. Sin embargo, al realizar esto se produjo alteraciones en el comportamiento entrada-salida del mismo, por lo que el modelo original no era innecesariamente complejo.

Análisis de la estabilidad relativa

La estabilidad relativa se refiere a cuán estable es el sistema expresado en forma cuantitativa, además de proporcionar una idea de qué tan cerca o lejos está el sistema del límite de estabilidad. Esta se expresa mediante el Margen de Ganancia (MG), y el Margen de Fase (MF) [13]. Se puede decir que si $MG > 1$ y $MF > 0$ el sistema es estable. En la figura 11 se puede apreciar que el sistema presenta un $MG=14.8$ dB y un $MF=62.3$ grados por lo que se concluye que el sistema es estable.

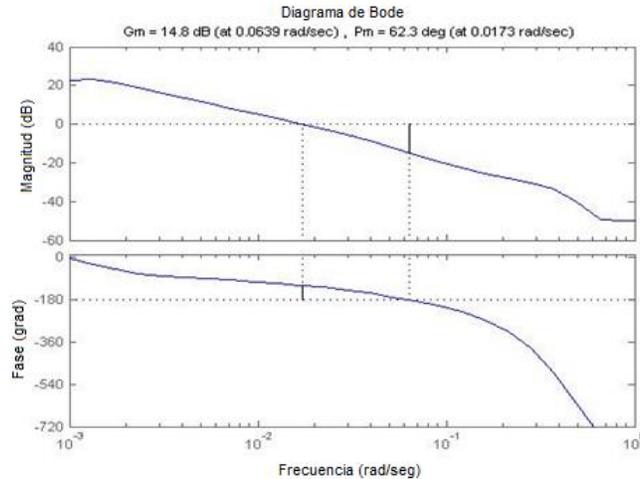


Figura 11
Diagrama de Bode del modelo.

Análisis del error del modelo

Otro criterio de validación es el de calcular la media del error del modelo. Si el porcentaje del error del modelo es menor que un por ciento de la media de la salida, el modelo es correcto. A escala de laboratorio se acepta un 2.5 % y en la industria entre 5 y 10 % [14].

Tabla 2. Análisis del porcentaje del error del modelo.

Media del error del modelo	Media de la salida	Porcentaje del error del modelo
3.4648e-004	51.4105	6.7396e-004

Trabajando con el criterio del 5%, por ser un experimento llevado a cabo en la industria, queda demostrado una vez más la validez el modelo.

RESULTADOS

Sintonía del controlador del porcentaje de oxígeno disuelto

Para lograr una adecuada sintonización del controlador del porcentaje de oxígeno disuelto se utilizó el método analítico del diagrama de Bode, el cual es muy conveniente cuando se conoce el modelo del sistema [10]. De este análisis se logró:

$$MG = 14.8 [dB] \quad w_{crit} = w_{cp} = 0.0639 \left[\frac{rad}{seg} \right] \quad (\text{frecuencia crítica=frecuencia de cruce de fase})$$

Con el uso de las expresiones (11) y (12) se obtuvo un período crítico de $P_{crit} = 98.3284$ segundos y una ganancia crítica de $K_{crit} = 5.4954$.

$$MG = 20 \log(K_{crit}) \tag{11}$$

$$P_{crit} = \frac{2\pi}{w_{crit}} \quad (12)$$

Partiendo de estos resultados y teniendo el modelo matemático de la planta se pueden obtener los parámetros del PID que se muestran en la tabla 3 con la ayuda de la tabla de Ziegler-Nichols que aparece en [13].

Tabla 3. Sintonización de controladores por el método analítico del diagrama de Bode.

Controlador	PI	PID
K_p	2.47293	3.2972
τ_i [s]	81.94	49.16
τ_d [s]	-	12.29

El diagrama en bloques del proceso a simular se muestra en la figura 12.

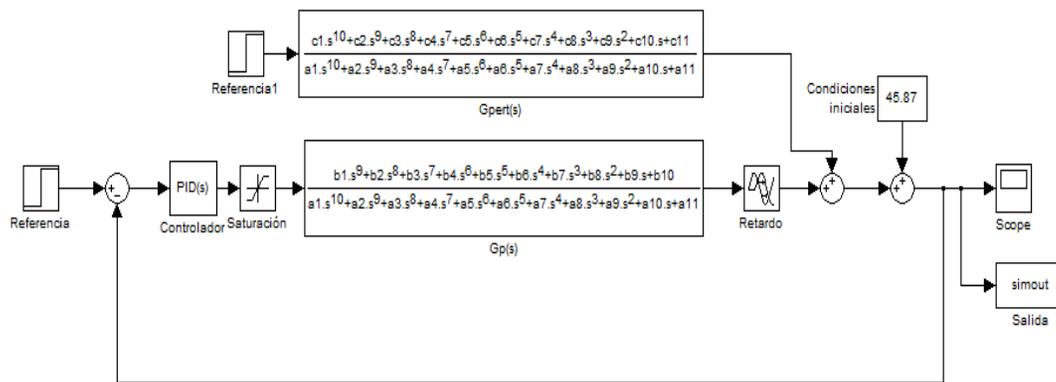


Figura 12

Diagrama en bloques del sistema de control del porcentaje de oxígeno disuelto.

Una vez ajustado los controladores con los parámetros teóricos calculados con anterioridad se realizaron numerosas pruebas con las diferentes variantes del PID (serie, paralela y convencional) y se llegó a la conclusión de que con la configuración paralela se logran los efectos deseados para el control del porcentaje de oxígeno disuelto. La misma permite modificar cada acción por separado. Con el calificativo de paralelo se quiere indicar que las tres acciones (proporcional, integral y derivativa) son independientes. Este tipo de algoritmo no tiene en principio ninguna ventaja respecto a los dos anteriores, salvo el poder ajustar cada acción por separado. Los resultados de la simulación del sistema se muestran en la figura 13.

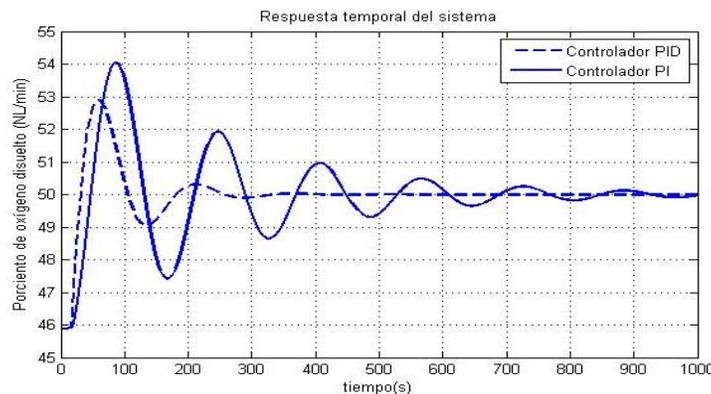


Figura 13

Respuesta del sistema ante un paso escalón en la referencia sin ajuste fino de los controladores.

De la gráfica anterior se puede concluir que el controlador PID ofrece una mejor respuesta en cuanto a los resultados deseados

para el control del porcentaje de oxígeno disuelto. Se llegó a la conclusión de que los valores teóricos no brindaron un resultado deseado en cuanto a las especificaciones de la respuesta temporal, pues a pesar de que el tiempo de establecimiento fue de 244 segundos (esto equivale a 4 minutos aproximadamente lo cual corresponde con la dinámica de esta variable) y el error de estado estacionario cero, el pico máximo fue de un 68.64% por lo que se procedió a un ajuste fino y se logró un resultado bastante aceptable de acuerdo con las características de la planta.

Para el ajuste fino de los parámetros del controlador PID analizado se tendrán en cuenta tres índices de comportamiento de la respuesta temporal: pico máximo (% M_p) menor de un 20%, un menor tiempo de establecimiento (t_s) y un error de estado estacionario (E_{ee}) de cero. El ajuste fino realizado arrojó los siguientes parámetros del controlador:

$$K_p = 2.099154 \quad \tau_i = 210.5 [s] \quad \tau_d = 19.5 [s]$$

La figura 14 muestra la respuesta temporal del sistema después de haber realizado el ajuste fino al controlador.

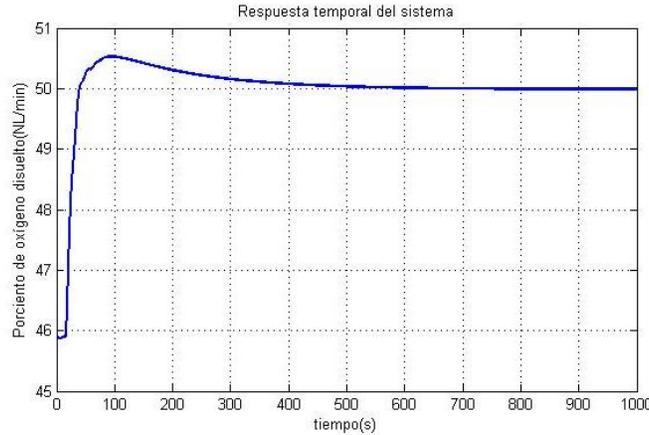


Figura 14

Respuesta del sistema ante un paso escalón en la referencia con ajuste fino del controlador.

En cuanto a las especificaciones de la respuesta temporal el error de estado estacionario fue nulo, el máximo sobreimpulso de 13.12% y el tiempo de establecimiento de 406 segundos.

Validación de la estructura del controlador del porcentaje de oxígeno disuelto

Como parte de la validación del sistema de regulación se calculó el porcentaje de error de control para los ajustes obtenidos con el controlador PID y la respuesta del sistema ante una perturbación.

Análisis del error de control

$$\%e_{control} = \frac{Varianza_{econtrol} + Media_{econtrol}}{Varianza_{referencia} + Media_{referencia}} * 100 \quad (13)$$

Utilizando las potencialidades que brinda el Simulink® se logra disponer de los datos que están involucrados en la expresión (13). A continuación se muestra la tabla 4 con los valores obtenidos:

Tabla 4. Valores obtenidos para el cálculo del error de simulación.

Parámetros	Media	Varianza
Error de control	0.0011	0.4112
Referencia	50	0

El error de control obtenido fue de 0.8246%, resultado satisfactorio pues cumple la condición de que el error de control es menor que el 2.5%, por lo que la estructura del regulador queda validada [14].

Respuesta ante una perturbación

Al sistema se le añade como perturbación un ruido blanco; esta prueba se realiza con este tipo de ruido, pues el mismo afecta a la mayoría de los sistemas [15]. Se le varía al sistema la potencia de ruido para ver cuál es el máximo nivel que tolera. En la figura 15 se puede observar el diagrama en bloques del sistema.

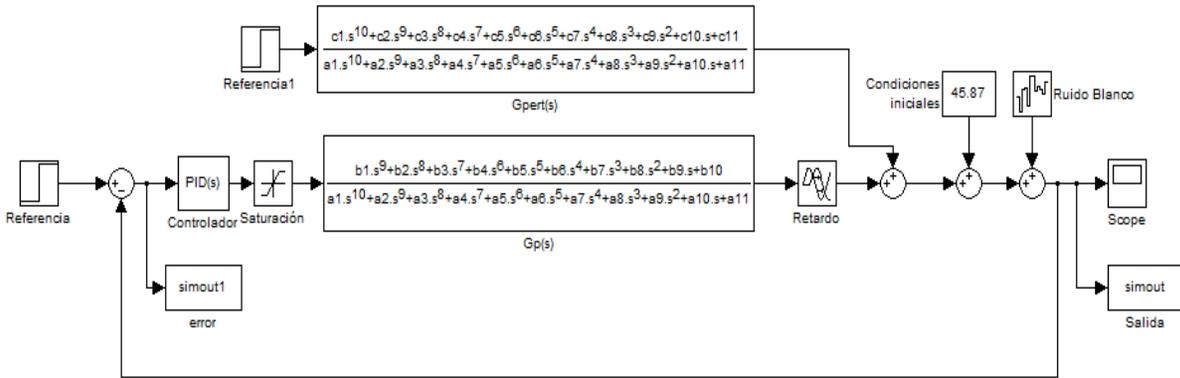


Figura 15

Diagrama en bloques del sistema ante una perturbación de ruido blanco.

Para saber el nivel de ruido que tolera el sistema, se varía el mismo hasta obtener un error de control igual o lo más cercano posible a 2.5 %. Este gráfico se obtiene para una potencia de ruido de 1.41, el cual da como resultado un error de control de 2.51%. Una perturbación con un nivel superior ya el sistema no respondería de manera confiable. De esta manera queda validado el sistema de control a utilizar para la regulación del porcentaje de oxígeno disuelto.

CONCLUSIONES

El trabajo experimental y el estudio realizado en el proceso de fermentación, haciendo énfasis en la variación del porcentaje de oxígeno disuelto, en el reactor R1 de la planta IFA de EPOVAC del Centro de Inmunología Molecular permitió concluir que:

- El proceso de fermentación en este reactor es muy sensible a las variaciones del porcentaje del oxígeno disuelto y por lo tanto el control efectivo de este variable es muy importante.
- El modelo matemático obtenido por modelado experimental o identificación de sistemas describe de manera correcta el comportamiento dinámico del porcentaje de oxígeno disuelto pues se sometió a prueba de validación y arrojó buenos resultados.
- El modelo matemático posibilitó realizar la sintonía del lazo para el control del porcentaje de oxígeno disuelto.
- La propuesta de algoritmo de control automático PID, puesto a prueba mediante la simulación, garantizó resultados satisfactorios en el ajuste del controlador.

REFERENCIAS

1. Colectivo de autores. Industria Biotecnológica en Cuba. [cited 2015 13 de enero]; Disponible en: www.ecured.com.
2. AG B. Biorreactor R1 MCR. Technical documentation, Job No. 19160.
3. Montoya Guzmán D. A., Bermúdez Segura, M. Y., Modelamiento de la transferencia de oxígeno para el cultivo de microorganismos en un biorreactor de columna de burbujeo [Proyecto Final]. Manizales: Universidad Nacional de Colombia; 2003. <http://www.bdigital.unal.edu.co/1159/1/didierabdrsmontoyaguzman.monica Yamilebermudezsegura.2003.pdf>

4. Torres López, A.M., Quintero Díaz, J.C., Garcés L.A. Determinación de la velocidad específica de consumo de oxígeno en microorganismos incluyendo el tiempo de respuesta del electrodo de oxígeno. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Antioquia. 2008 (43):33-41.
5. Colectivo de autores. Consumo de oxígeno [cited 2015 26 de enero]; Disponible en: <http://procesosbio.wikispaces.com>.
6. Hernández S.R. Determinación de la biomasa en biorreactores de tanque agitado a escala piloto. [Ingeniería]. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE); 2011.
7. Ljung L. System Identification. Theory for the user. Second Edition ed. Kailath T, editor. United States of América: Practice Hall Information and System Sciences Series; 1999.
8. Marchante González G., Piedra Puerta, D. Diseño del sistema automatizado para el control de la velocidad de agitación y el control del porcentaje de oxígeno disuelto en el Fermentador R1 de la Planta de IFA de EPOVAC del Centro de Inmunología Molecular [Ingeniería]. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE); 2015.
9. Ljung L. Modeling of Dynamic System. Second Edition ed. Kailath T, editor. United States of América: Practice Hall Information and System Sciences Series; 1994.
10. Kuo BC. Sistemas de Control Automático. Séptima Edición ed. México: Practice Hall Hispanoamérica S.A.; 1996 respecto a la primera edición en español publicada.931 p.
11. MathWorks® Inc., System Identification Toolbox, Versión 7.4.1 (R2010b).
12. Brian Roffel BB. Process Dynamics and Control. Modeling for Control and Prediction. England: John Wiley & Sons, Ltd; 2006.
13. Ogata K. Ingeniería de Control Moderna. Tercera Edición ed. México: PEARSON, Practice Hall; 1998. 1015 p.
14. Hoyos G.V. Identificación y control del reflujo de solvente en la etapa de extracción del proceso de obtención del policosanol. [Ingeniería]. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE); 2003.
15. Behar AA. Temas de identificación y control adaptable. La Habana: Instituto de Cibernética Matemática y Física; 2000. Empresa de Comunicación de Ciencia y Tecnología, PALCIEN.

AUTORES

Greta Marchante González, Ing. Automática, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, greta.mg@electronica.cujae.edu.cu

Dayana Piedra Puerta, Ing. Automática, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, dayana.pp@electronica.cujae.edu.cu

CO-AUTORES

Yusmeily Díaz Puebla, Ing. Automática, Centro de Inmunología Molecular, La Habana, Cuba, yusmeily@cim.sld.cu

Ana Isabel González Santos, Ing. Máquinas Computadoras, Master en Automática, Dra. Tecnologías de la Información homologado a Dra. Ciencias Técnicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, anita@electronica.cujae.edu.cu