

Diseño e implementación de un control adaptivo para pH y temperatura en la hidrólisis enzimática

J. De la Cruz Alejo^{1,2}, N.I. Hernández Rico¹, A. Mora Ortega², A.E. Márquez Ortega³ y M.B. Arce Vazquez^{2*}

¹Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anáhuac, C.P. 55210, Ecatepec de Morelos, Estado de México

²Maestría en Eficiencia Energética y Energías Renovables, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Av. Tecnológico S/N, Valle de Anáhuac, C.P. 55210, Ecatepec de Morelos, Estado de México

³División de Ingeniería Química, Tecnológico de Estudios Superiores de Chimalhuacán, 56330, Chimalhuacán, México.
[*mariaarce@tese.edu.mx](mailto:mariaarce@tese.edu.mx)

Área de participación: Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Resumen

En la actualidad existe una gran variedad de procesos que requieren mantener ciertas condiciones de operación, es decir, controlar uno o varios tipos de variables físicas, como temperatura, presión, humedad, tiempo, pH, entre otras. El control de dichas variables debe ser lo más exacto posible, ya que de esto depende el correcto funcionamiento del proceso. Este problema puede solucionarse con el uso de los filtros adaptivos que son sistemas que se adaptan automáticamente a los cambios en su entorno; por ello son utilizados para minimizar el error. En este trabajo se realizó el diseño e implementación de un filtro adaptivo para el control de temperatura y pH en un biorreactor donde se realizó el proceso de hidrólisis enzimática sobre biomasa lignocelulósica de amaranto, obteniendo hasta 533.6 ± 2.2 mgG/mL de azúcares fermentables significando un aumento del 16% con respecto a condiciones sin control.

Palabras clave: control adaptivo, hidrólisis enzimática, control de pH, control de Temperatura

Abstract

There are currently a wide variety of processes that require maintaining certain operating conditions, in other words, controlling one or more types of physical variables, such as temperature, pressure, humidity, time, pH, among others. The control of these variables should be as accurate as possible because this depends on the correct functioning of the process. This problem can be solved with the use of adaptive filters that are systems that automatically adapt to changes in your environment; this is why they are used to control and adjust the level of a physical variable to the desired level or expected by the process with the slightest mistake. This work the design and implementation of an adaptive filter for temperature and pH control was carried out in a bioreactor where the enzymatic hydrolysis process was carried out on lignocellulosic amaranth biomass, obtaining up to 533.6 ± 2.2 mgG/mL of fermentable sugars, meaning a 16% increase over uncontrolled conditions.

Key words: adaptive control, enzymatic hydrolysis, pH control, temperature control

Introducción

En la actualidad, la catálisis enzimática es una práctica común en donde se busca mejorar la velocidad en las reacciones, donde, es importante la selectividad de sustratos y productos. Este tipo de procesos a nivel industrial se prefieren por simplificar los procesos, por reducir el impacto ambiental y por ser más sostenible [1] que la síntesis química, por lo que la industria alimentaria, farmacéutica, agrícola y química están incluyendo la biocatálisis en sus procesos [2]. Específicamente en el área de biocombustibles a partir de biomasa lignocelulósica, se busca la aplicación de procesos

biocatalíticos para tener un control sobre la ruptura de la matriz de lignina-celulosa-hemicelulosa, que libere azúcares fermentables como un pretratamiento, en una etapa subsecuente se utilizan como sustrato para la producción de bioetanol. Existen diferentes tipos de reactores para llevar a cabo la hidrólisis enzimática, los cuales deben ser capaces de mantener las condiciones de temperatura, pH, volumen, presión, espuma, velocidad de agitación, velocidad de flujo gaseoso, flujo líquido, O_2 disuelto, CO_2 disuelto, O_2 fase gaseosa, CO_2 fase gaseosa y el tiempo [3]. En todos ellos, se busca controlar estas variables de manera que se optimice la hidrólisis catalítica. Este tipo de reactores llegan a tener costos muy elevados, ya que se convierten en máquinas automáticas que controlan minuciosamente cada una de estas características, son reprogramables e incluso en algunas de ellas sólo se deben elegir ciertos valores para cada proceso [4]. Para la operatividad de estos reactores se deben contar con todos los módulos de control, sin embargo, en diversos laboratorios se tiene la dificultad de adquisición de dichos módulos, por que la mayoría se importa y además al costo unitario se suman gastos de envío entre otros, con lo que aumenta su costo de venta, por lo que se buscan alternativas que sean accesibles y aplicables para llevar a cabo el proceso de manera controlada y a bajo costo.

Existen diferentes teorías de control que pueden implementarse a los reactores biológicos, las cuales establecen una organización de las variables de tal manera que se optimice el proceso y sea más accesible que las máquinas actuales. A través de sensores y actuadores, se supervisan estas variables, que van cambiando con el paso del tiempo; el control por filtro adaptivo (CFA), tiene la capacidad de detectar este cambio o error relativo en la señal de salida en comparación con la señal deseada. Y se repite tantas veces como sea necesario para llevar este valor del error a cero, de tal forma que se obtenga una señal de salida lo más cercana a la señal deseada. El funcionamiento de un filtro adaptivo LMS depende de ciertos factores, los cuales son el número de pesos (coeficientes) y el tamaño de paso μ . Estos factores determinan la velocidad de convergencia y el tamaño del error que se debe eliminar del sistema. Las señales de error y de salida del filtro modifican la cantidad de pesos (coeficientes) y provocan el aumento o reducción en el tamaño de paso, es decir, modifican la velocidad en que el sistema converge. El tamaño del paso μ , este factor determina la velocidad de convergencia (tiempo en que se la señal de salida del filtro $y(n)$ y la señal deseada $d(n)$ se parecen lo más posible), y la cantidad de error que se elimina en un sistema. [3] Los filtros adaptivos tienen diferentes aplicaciones dentro del área de control de cualquier sistema o proceso que necesite estar bajo condiciones especiales, es decir, mantener en un valor las variables físicas. En los procesos de hidrólisis enzimática sobre biomasa lignocelulósica donde las variables que se deben controlar principalmente son el pH y la temperatura [5], se puede implementar un sistema de control usando un filtro adaptivo para regular dichas variables. Este tipo de aplicación sobre los filtros adaptivos ha sido poco explotado a lo largo de su creación, por esta razón, en este trabajo se tuvo por objeto realizar el diseño de un CFA que permitirá controlar las variables de pH y Temperatura en un cierto tiempo, para que el proceso de hidrólisis enzimática sea el óptimo dentro de un reactor biológico, para la liberación de azúcares fermentadas.

Metodología

Caracterización de las variables pH y Temperatura

Para la caracterización de los cambios en el pH, se realizaron las soluciones reguladoras de trabajo HCL y NaOH 1M respectivamente valoradas. Para la caracterización del potenciómetro se utilizó el medidor de pH /Mv de mesa SM-25CW adaptado al biorreactor, un medidor de pH del laboratorio Oakton PC2700 y un multímetro digital, se realizó la medición de el cambio en el pH y su respectivo valor de diferencia de potencial (volts) en cada punto de 1 a 9 utilizando las soluciones amortiguadoras. Posteriormente se registraron las lecturas de pH en una solución buffer de fosfatos pH 4.5, donde se adicionó 10 μ L de la solución reguladora de NaOH, con una pipeta RadWag 0.5 μ L-10 μ L, se repitió hasta alcanzar 9 de pH. En otro ensayo se utilizó solución buffer de fosfatos pH 4.5 y se adicionó 10 μ L de la solución reguladora de HCl, con la pipeta RadWag registrando cada punto hasta un pH de 1.5. Se utilizó agua destilada como control. Las pruebas se realizaron por triplicado y los datos obtenidos fueron analizados mediante StatGraphics.

Para la caracterización de la temperatura y los cambios que registra se utilizó el sensor DS18B20, de sonda impermeable. Su rango de medición es -55° a 125° C, la resolución o variación mínima entre cada valor medido es de 1° C, para ello se utilizó la resolución de 12 bits. Se realizaron pruebas con las soluciones puestas a calentamiento de T_{ambiente} hasta 65° C, registrando la temperatura con un termómetro de mercurio y se determinó los valores de la señal de salida que proporciona el sensor. Se repitió el experimento ahora enfriando la solución de T_{ambiente} hasta 15° C. Todas las pruebas realizadas fueron en triplicado.

Diseño del control de filtro adaptivo (CFA)

En un primer paso se programa la estructura del filtro adaptivo utilizando el algoritmo LMS de 10 pasos, donde se selecciona el orden del filtro (cantidad de pesos o retardos de la señal), se elige el tamaño de paso o velocidad de convergencia μ , se inicializa los pesos (coeficientes) $w(n)$ en cero, se actualiza la señal de entrada $x(n)$, se actualiza la señal deseada $d(n)$, se calcula la salida del filtro $y(n)$, se calcula el tamaño del error $e(n)$, posteriormente se actualiza el valor de los pesos del filtro $w(n)$, repetir desde la actualización de la señal de entrada [6].

Diseño del biorreactor con un sistema electromecánico.

Se realizó el diseño y dimensionamiento del biorreactor de acuerdo con el proceso de hidrólisis enzimática secuencial de biomasa lignocelulósica de amaranto que se lleva a cabo en el laboratorio de Biocombustibles del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec [5], donde se tienen volúmenes de trabajo a nivel laboratorio, con una carga máxima de 1L. Una vez establecido el diseño del vaso y tapas del biorreactor se procedió a establecer una estructura que cumpla con los requerimientos mínimos necesarios para llevar a cabo las cinéticas de hidrólisis de manera eficiente.

El diseño mecánico de la base y sus componentes, fue realizado con base en las medidas de cada uno de los elementos que lleva el proceso de automatización, de tal forma que en la misma placa se coloquen los dispositivos electrónicos tales como; la placa del microcontrolador, los motores con las válvulas, el motor con el agitador orbital, la bomba con el tanque de agua para el paso de refrigerante y por último las conexiones directas de los sensores de temperatura y pH que deben controlarse para que el proceso sea óptimo. Las dimensiones propuestas en ambos casos no son similares a la de los biorreactores comerciales, sin embargo, presenta los instrumentos necesarios para el control de T y pH.

Implementación del filtro adaptivo LMS

Se realizó una simulación en Matlab del filtro adaptivo LMS [6 y 7] así como el diagrama a bloques que simula dicho filtro. Como se mencionó anteriormente se utilizaron comandos y operadores aritméticos descritos en la figura 2. La señal deseada $d(n)$ se generó mediante la Ec. 1. Mientras que el ruido que se suma a la señal de entrada se generó por la Ec. 2. La Ec. 3 nos proporciona la suma de la señal de deseada y el ruido que es la señal de entrada.

$$t = 0:0.01:100; \text{deseada} = \sin(t) + 1.5; (1)$$

$$\text{ruido} = \frac{\text{rand}(\text{size}(t))}{2}; (2)$$

$$\text{entrada} = \text{deseada} + \text{ruido}; (3)$$

Una vez establecidas las variables de entrada y los pasos, se definen las tres señales principales, el ruido, la de entrada y la deseada. Posteriormente se inicia con un ciclo *for* para la comparación de la señal de entrada con la señal deseada y se establece la señal de error. Posteriormente se realizó la programación del microcontrolador, arduino UNO, la conexión a la PC y la implementación del filtro adaptivo LMS. Se utilizó un software libre en la página oficial del Arduino, se instalaron los controladores correspondientes a la placa del arduino UNO (Figura 1a). Se realizó una simulación en Matlab del filtro adaptivo LMS [9] así como el diagrama a bloques que simula dicho filtro, se realizó un esquema del filtro adaptivo LMS en MATLAB Simulink, ver Figura 1b.

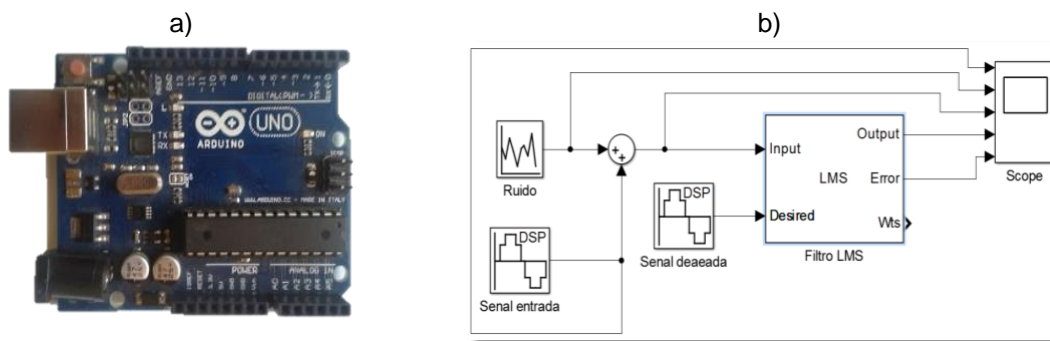


Figura 1. a) Plataforma Arduino b) Esquema del filtro adaptivo LMS en Matlab-Simulink.

Funcionamiento del control en la hidrólisis enzimática

Se adiciono 500mL de buffer de fosfatos pH 4.5 al reactor biológico, posteriormente se adiciono el 20% p/v de biomasa lignocelulósica de amaranto previamente desengrasada, se mantuvo en agitación de 150 rpm. Se registraron lecturas de T y pH durante 3 h y 1 min, respectivamente. Posteriormente se ajusto a 50°C y pH 4.5 para la enzima Endo 1-4-b-D-glucanosa. Se realizó la medición de T y pH cada 10 min durante el tiempo de reacción. Se utilizó un sistema sin CFA como control para cada tratamiento. Se cuantifico los azucres libres por el método DNS [8] para cada tratamiento.

Resultados y discusión

Calidad de la señal de respuesta de las variables de T y pH

La caracterización se muestra en la Figura 2, donde se observa que para el caso de pH se tienen datos con mayor variabilidad cuando se acerca a la neutralidad mientras que en los extremos máximos y mínimos hay mejor dispersión de los datos, además de que presentan un coeficiente de correlación (r) aproximadamente de 1, por lo que es una curva de calibración de alta confiabilidad. Para el caso de la Temperatura (T) se monitorio de 15 a 65°C ya que es el rango en el que se realizan las hidrólisis de biomasa lignocelulósica reportadas. Se observa que se tiene un r cercano a 1 por lo que el modelo de estimación es altamente confiable y además la T es proporcional con el voltaje reportado. Las pruebas realizadas proporcionan la caracterización de las variables para ser implementadas en la programación del filtro adaptivo, el cual requiere de los datos máximos y mínimos que puede reportar cada uno de los sensores durante el proceso, así como los datos exactos para localizar las señales deseadas.

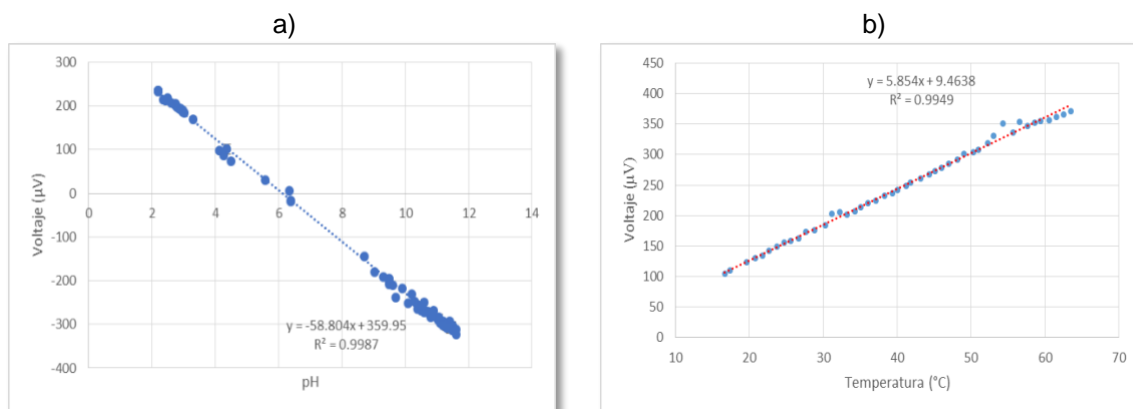


Figura 2. Caracterización de pH y T. a) Curva de calibración de pH b) Curva de calibración de T.

Control de filtro adaptivo (CFA)

A partir de los datos obtenidos se realizó el programa correspondiente para controlar las señales de entrada que resultan del proceso de hidrólisis y que se compararán con la señal deseada colocada en el programa del filtro para reducir el error, mandando señales a los actuadores (motores), hasta reducir el error y que la señal de entrada sea casi igual a la señal deseada o señal de control Figura 3a y 3b.

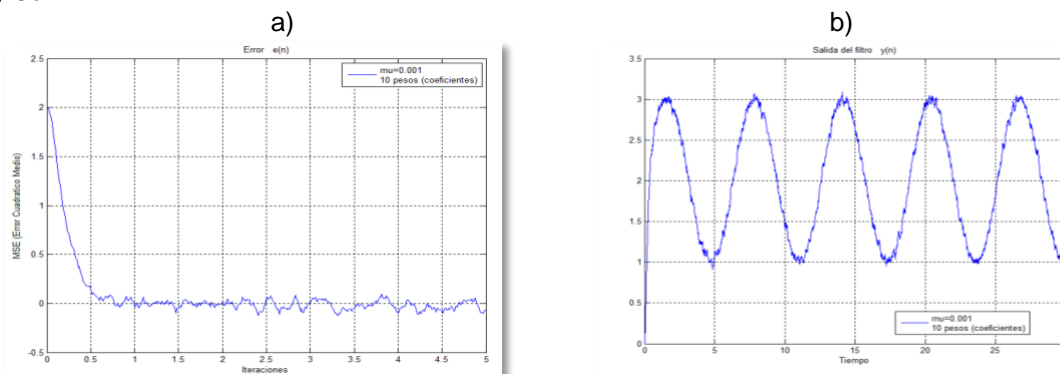


Figura 3. a) Señal de error de un filtro adaptivo con 10 pesos (coeficientes) con tamaño de paso μ de 0.001 b) Salida de un filtro adaptivo LMS con 10 pesos (coeficientes) con tamaño de paso μ de 0.001.

Los resultados muestran que el tamaño de paso μ es directamente proporcional a la velocidad de convergencia, es decir, el filtro converge a mayor velocidad con un tamaño de paso 0.01 y más lento con un tamaño de paso de 0.001, el tamaño de paso μ determina la cantidad de error que se puede eliminar del sistema, es decir, con un tamaño de paso de 0.001 el tamaño del error es menor que con un tamaño de paso de 0.01. Así mismo, con el cambio de los pesos y los coeficientes, se observa que conforme se incrementa la cantidad de pesos (coeficientes) w_m y se reduce el tamaño de paso μ , la calidad y resolución de la señal de salida aumenta.

Implementación del filtro adaptativo LMS

La implementación del filtro adaptativo LMS en hardware para su aplicación, se realiza en una plataforma Arduino, que es una placa de hardware que incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines hembra conectados internamente a los pines de E / S del microcontrolador, que permiten conectar diferentes dispositivos como sensores y actuadores. En este trabajo, la plataforma Arduino Uno, se utiliza como se muestra en la fig. 4.

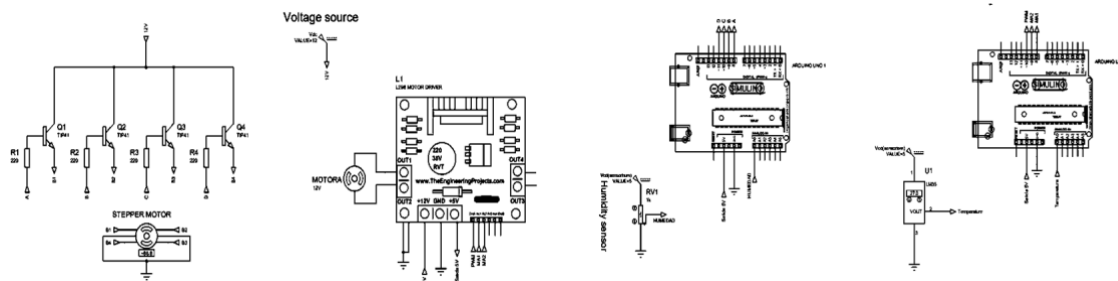


Figura 4. Sistema electrónico de control de temperatura y humedad.

El funcionamiento del circuito electrónico mostrado en la figura 4, es: Mediante el sensor de humedad o temperatura, se mide el nivel de temperatura o pH dentro del biorreactor, luego este dato es recibido por el Arduino UNO y, a su vez, ejecuta el filtro adaptativo LMS. Asimismo, el Arduino UNO se encarga de correlacionar la señal de error $e(n)$, con el número de pasos que dará el motor paso

a paso o la velocidad de rotación que tendrá el motor DC y consecuentemente ajustar la temperatura y pH en el biorreactor. Los esquemas electrónicos que se muestran en la figura 8, fueron diseñados, simulados y su funcionamiento fue verificado en el software Proteus. Los dispositivos electrónicos que se utilizaron para la construcción del sistema de control son: Arduino UNO, sensor de temperatura LM35, sensor de temperatura de piso FC-28, módulo de motor L298N, motor paso a paso 17 PM-K031-P1V, motor DC, TIP41 transistores de potencia y resistencias de 220 Ω .

Especificaciones del biorreactor con un sistema electromecánico

Para el diseño del biorreactor se consideró que la tapa del vaso debe contar con entradas para los sensores de temperatura y pH, una entrada específica para introducir las enzimas, otra entrada para el agitador y dos entradas para las soluciones reguladoras. El modelo del biorreactor se realizó en el software de apoyo de CATIA V5. Se realizaron con base en las medidas estándar. En la Figura 5 a y b se muestra el diseño final del biorreactor y en la figura 5 c y d se muestra el diseño de la estructura base para contener al biorreactor y los actuadores, así como los sensores. En la tabla 1 se muestran las especificaciones de los materiales y dimensiones empleados para la construcción del biorreactor.

PARTE DEL BIOREACTOR	MATERIAL EMPLEADO
Vaso	Vidrio Pyrex. Capacidad 1L
Cuerpo del reactor	Acero inoxidable 316-L
Tapa	25 cm de diámetro. Acero inoxidable 316-L
Tubos de muestreo	2 tubos, de 24 y 25 cm de largo
Tubos de aireación	2 tubos, de 10 cm de largo.
Deflectores	4 planos, 17 cm x 11.1 mm, calibre 20
Termopozo	1, 15.5 cm x 10 mm
Anillos de soporte	2 anillos
Serpentín	Acero inoxidable 316-L
Malla eléctrica	Acero inoxidable

Tabla 1. Especificaciones del material empleado para la elaboración del biorreactor.

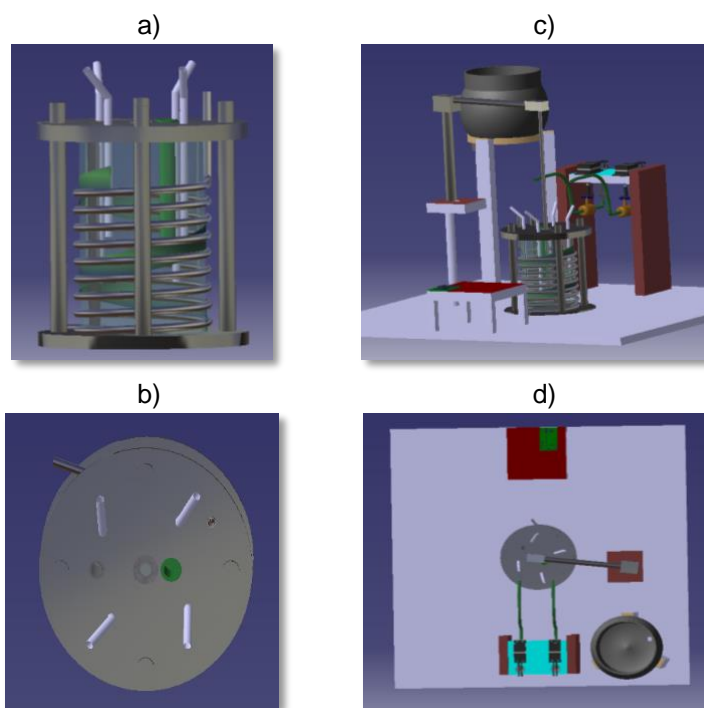


Figura 5. Diseño del biorreactor para hidrólisis enzimática de biomasa lignocelulósica. a) vista frontal b) vista superior c) Diseño de la base para biorreactor con actuadores y sensores, vista lateral derecha d) Diseño de la base, vista superior.

Para la estructura base del biorreactor se utilizó 1 tableta Arduino UNO, un sensor de temperatura DS18B20, un sensor de pH PC2700, un modulo para motores L298N, 2 motores de paso a paso 17PM-K031-P1V, 1 motor CD s/n, 3 válvulas tipo nariz, transistores de potencia TIP 41, mangueras de plástico y conectores. Con lo que se obtuvo un biorreactor funcional para el laboratorio de biocombustibles del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

Validación del control en la hidrólisis enzimática

En la Figura 6a se muestran los cambios de T y la actuación del control de la temperatura en el tiempo y ante los cambios en el entorno durante el tiempo observado. Los resultados obtenidos para el caso del control de la temperatura utilizaron una malla eléctrica alrededor del reactor biológico, la

temperatura inicial fue de 24°C controlado en el biorreactor, al encender la malla hasta obtener la temperatura de 50°C se observa que la temperatura no incremente ni disminuya durante aproximadamente tres horas.

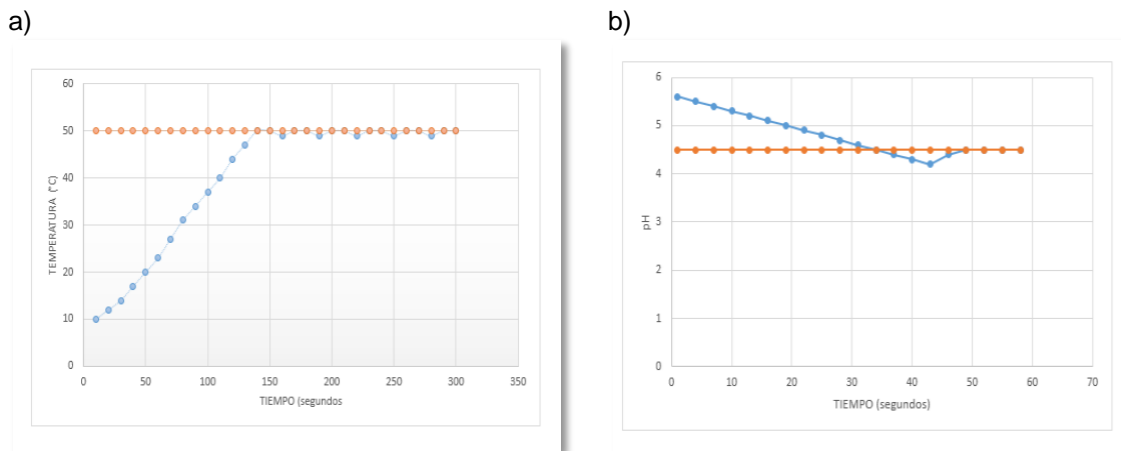


Figura 6. Actuación del control de a) Temperatura y b) pH, sobre una hidrólisis enzimática de biomasa lignocelulósica de amaranto.

En la Figura 6b, se muestra el proceso del control del pH en el tiempo y ante los cambios en el entorno. En el control del pH, se utilizaron dos motores con su respectiva válvula, ambos controlados con la respuesta del sensor de pH que se encuentra dentro del biorreactor, el valor aproximado del pH en la solución dentro del biorreactor debe ser censada, aproximadamente se encuentra entre 5.6 y 6, dependiendo las condiciones de las enzimas que se deben agregar a la mezcla, para el proceso, la señal deseada es de 4.5 y con el filtro se controló ya que el pH no incrementó ni disminuyó durante aproximadamente 1 min, en el contenedor 1 (motor 1 y llave 1) se coloca la solución base y en el contenedor 2 (motor 2 y llave 2) se coloca la solución ácido.

Por lo tanto, al recibir la señal de entrada del sensor de pH se abrirá la llave 2 y se cerrará hasta que el filtro indique que el error ya es cero, si la señal de entrada baja a menos de 4.5, entonces se abrirá la llave 1 para subir el valor en el pH. Los resultados se encuentran dentro del rango reportado por Báez (2019)[10], donde realizaron un sistema de control y temperatura en un reactor a nivel piloto.

Durante el proceso de hidrólisis se pudo observar una liberación máxima de hasta 461.2 ± 1.7 mgG/mL a partir de la biomasa lignocelulósica de amaranto sin llevar el control, similar a lo reportado por Lecona 2019 [5], mientras que cuando se controla con la implementación del filtro adaptivo el sistema aumento aproximadamente 16% la liberación de azúcares fermentables (533.6 ± 2.2 mgG/mL). Este aumento significativo se debe a que durante el proceso de hidrólisis sin control puede variar la temperatura del ambiente bajo las condiciones climáticas y por otro lado puede haber variaciones de pH por la liberación de protones de la misma hidrólisis, ambos efectos pueden ser decisivos para que las enzimas no mantengan las condiciones óptimas y por ende baja su eficiencia. Por lo anterior, se reitera la importancia de tener el pH y la temperatura controlada en las reacciones dentro del reactor biológico para la hidrólisis enzimática de biomasa lignocelulósica de amaranto.

Trabajo a futuro

Se desea implementar el control durante el proceso de fermentación de azúcares libres de la biomasa lignocelulósica de amaranto para la obtención de bioetanol, en el cual intervienen el monitoreo de O_2 y CO_2 , que se realiza en el laboratorio de biocombustibles del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

Conclusiones

En el presente trabajo se realizó el diseño y la simulación de la implementación de un filtro adaptivo para el control de temperatura y pH, durante el proceso de hidrólisis enzimática, dentro de un reactor biológico, para la obtención de azúcares fermentadas. Se utilizó un microcontrolador, para recibir las señales físicas de entrada, captadas por sensores, las cuales fueron procesadas por medio del algoritmo LMS; se obtuvieron señales de error mínimas en comparación con las señales deseadas, estas señales de salida ya procesadas fueron enviadas a actuadores para llevar a cabo el proceso requerido y optimizar la obtención azúcares liberados.

A través de la simulación se observó que, aunque la temperatura continúe variando, es decir aumentando o disminuyendo, el control del filtro adaptivo utilizado inicia su acción de control para corregir el valor deseado, a través de iteraciones hasta alcanzar la estabilidad, que en este caso es tener un error de aproximación prácticamente igual a cero y lograr que la señal de entrada sea aproximadamente igual a la señal deseada. De una forma similar realiza el control del pH, ya que requiere de la apertura y cierre de dos llaves que contienen diferentes soluciones para dar el equilibrio de la señal deseada en comparación con la señal de entrada. Con base a estos resultados se concluye que el filtro adaptivo tiene una controlabilidad óptima de la temperatura y del pH en el proceso de hidrólisis, para obtener 16% más la liberación de azúcares.

Referencias

- [1] B. M. Bonk, J. W. Weis, and B. Tidor, "Machine Learning Identifies Chemical Characteristics That Promote Enzyme Catalysis," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 141 no. 9, 4108-4118, 2019.
- [2] A. Basso, and S. Serban, "Industrial applications of immobilized enzymes—A review," *Molecular Catalysis*, vol.479, 110607, 2019.
- [3] H.P. Nel Martínez, C.A. Calderón Casallas and C.A. Ruiz Ortiz. "Metodología para el diseño de un biorreactor secuencial-Methodology for the Design of a Sequential Bioreactor." *Ingenium Revista de la facultad de ingeniería*, vol.18 no.36, 11-25, 2017.
- [4] F.A.O. Quintana and H. Alvarez. "Enfrentando el modelado de bioprocesos: una revisión de las metodologías de modelado." *Revista ION*, vol. 30, no. 1, 2017.
- [5] Z. B.O. Lecona, A. Mora-Ortega, A.J. De la Cruz, A.E. Márquez Ortega and M.B. Arce-Vazquez, "Sacarificación enzimática de biomasa residual de amaranto para la obtención de bioetanol," *Journal CIM*, Vol. 7, Núm 1, 1300-1307, ISSN 2007-8102, 2019.
- [6] C.S. Palacios, and S. Luna Romero. "Calibración automática en filtros adaptativos para el procesamiento de señales EMG." *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 16, no.2, 232-237, 2019.
- [7] A.K. Maurya, A. Priyanka and D. Shubhra, "Modified model and algorithm of lms adaptive filter for noise cancellation." *Circuits, Systems, and Signal Processing*, vol. 38, no. 5, 2351-2368, 2019.
- [8] Miller, G.L. "Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar," *Analytical Chemistry*, vol. 31, 426-428, 1959.
- [9] S.C. Chapra, "Applied numerical methods with MATLAB for engineers and scientists," *New York: McGraw-Hill*, 588-635, 2012.
- [10] L. Báez Rodríguez, J.P. Rodríguez Jarquín, A. Martínez Sibaja, R. Posada Gómez and G. Águila Rodríguez, "Sistema automatizado para la medición de pH en un biorreactor," *Journal CIM*, Vol. 7, Núm 1, 1191-1199, ISSN 2007-8102, 2019.