

Automatización de un reactor anaerobio para la digestión de lodos de una planta tratadora de aguas residuales

Luz Angélica García Villalba², Raúl Ñeco Caberta¹, Carlos Ponce Corral², María Magdalena Hernández Ramos¹, Carlos Felipe Ramírez Espinosa¹, Felipe Adrián Vázquez Gálvez³

¹ Ingeniería en sistemas Automotrices, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

² Departamento de Industrial y Manufactura, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

³ Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Resumen

Las proyecciones del aumento de la población apuntan al alza significativamente, en consecuencia, se tiene un crecimiento de las grandes urbes y a la vez las organizaciones que proporcionan servicios públicos como agua potable, drenaje y red eléctrica a los habitantes de estas, sufren una gran demanda [1]. Si bien se sabe algunos de los servicios más demandados son el agua potable y a su vez el drenaje, es por esto, que desde principios del silo XX las grandes ciudades optaron por construir plantas tratadoras de aguas negras [5]. En la presente investigación se realiza el diseño de un reactor anaerobio piloto para el tratamiento de lodos residuales [3], y un sistema de adquisición de datos encargado de monitorear las variables que influyen en la digestión anaerobia, esto con la finalidad de mantener dichos parámetros dentro de cierto rango para acelerar el proceso de digestión [23]. Se realizan los cálculos matemáticos necesarios para determinar cuál será la presión máxima de operación a la que el reactor podrá ser sometido, se hace una selección del material adecuado para la construcción del reactor y se calculan los esfuerzos máximos permisibles longitudinal y circunferencial de las juntas que unen el material para dar forma a el reactor. Por último, se diseña una interfaz gráfica en el software de LabView para poder tener un monitoreo constante del sistema y nos sirva de herramienta para elaborar un análisis de los resultados obtenidos en la investigación [7].

Palabras Clave: Digestor, reactor anaerobio, lodo residual.

Introducción

Actualmente las proyecciones del aumento de la población apuntan al alza significativamente, en consecuencia, se tiene un crecimiento de las grandes urbes y a la vez las organizaciones que proporcionan servicios públicos agua potable, drenaje y red eléctrica a

¹ Ingeniería en sistemas Automotrices, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

² Departamento de Industrial y Manufactura, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

³ Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

los habitantes. Si bien se sabe algunos de los servicios más demandados son el agua potable y a su vez el drenaje, es por esto, que desde principios del siglo XX las grandes ciudades optaron por construir plantas tratadoras de aguas negras. Se debe mencionar que, para lograr tratar las aguas negras adecuadamente, estas realizan un recorrido a lo largo de tres procesos fundamentales: Lora F. y Jiménez D. [2], mencionan las tres fases necesarias dentro de las plantas tratadoras de aguas residuales.

En la primera fase las aguas que llegan a la planta reciben un tratamiento primario que consiste en la decantación o sedimentación por gravedad de una parte de la materia orgánica en suspensión y el retiro de grasas, aceites y sobrenadantes. Después en algunos casos la materia sedimentada pasa a un digestor anaerobio para ser tratada biológicamente, en otros casos la materia es dispersada y mezclada con óxido de calcio CaO en un área determinada para ser secada de manera natural. En la

segunda fase el agua pasa a un tanque de aireación en donde se lleva a cabo un proceso de degradación de la materia orgánica mediante un tratamiento biológico que utiliza bacterias aerobias como un primer paso para remover hasta cerca del 90 % de los desechos biodegradables que requieren oxígeno, posteriormente pasa a un tanque de desinfección por cloro y después se descarga para su reutilización, aunque esta aún no se puede utilizar domésticamente. Por último, el agua se puede someter a los procesos de micro filtración, absorción por carbón activado, intercambio iónico, osmosis inversa, electrodiálisis, remoción de nutrientes, cloración u ozonización. Lo que se busca con cualquiera de estos procesos es eliminar los contaminantes orgánicos, los nutrientes como los iones, fosfato y nitrato o cualquier exceso de sales minerales. En el tratamiento terciario se pretende que el agua sea lo más pura posible antes de ser descargada al medio ambiente.

Metodología

Para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto se diseñará un prototipo a escala de un reactor de alta tasa (flujo continuo), basado en un problema, el cual consiste en diseñar un reactor anaerobio para el tratamiento de lodos activados dentro de una planta de tratamiento de aguas residuales que trata las aguas de 21,170 personas. La alimentación al digestor (efluente de entrada) es de 1680 ft³/día, la temperatura y el pH de funcionamiento son de 35 a 38 °C y 6.8 a 7.2 respectivamente. En este prototipo se debe mantener la temperatura y el flujo adecuado del efluente, además de que se incluye un sistema de mezcla, el cual será neumático, un monitoreo del nivel del efluente dentro del reactor, un monitoreo de la presión del gas generado dentro del mismo y monitoreo del pH del sustrato tratado. En primera instancia se cuenta con una entrada de efluente, el cual proviene de una

fuerza externa al sistema, el efluente o sustrato es succionado por la bomba B1 y a su vez, esta regula la cantidad del mismo, posteriormente se cuenta con la electroválvula E1, cuya función es permitir el paso del sustrato hacia el reactor sin que se pueda existir un retroceso del mismo, además en el prototipo se incluye un calentador C, para acondicionar la temperatura del sustrato 38 °C a aproximadamente. En la Figura 1 se muestra un bosquejo de cómo sería el sistema físicamente.

Otro componente fundamental es la bomba B2, la cual se activa al disminuir la temperatura y simultáneamente se activan las electroválvulas E2 y E3, estos trabajan en conjunto para recircular el sustrato y mantener la temperatura dentro del rango ya antes mencionado.

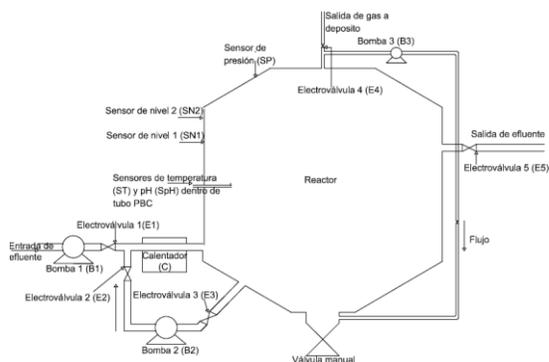


Figura 1: Diseño del sistema y componentes.

En el prototipo se incluye un sistema de mezclado para mantener una mezcla homogénea del sustrato, este cuenta con una bomba B3 la cual tiene la función de succionar y recircular el gas producido por la digestión anaerobia, e introducirlo en la parte inferior del reactor para realizar un mezclado por burbujeo. Además de que se incorporará un sistema de medición basado en el monitoreo de: temperatura, pH, presión, y nivel. Mediante sus respectivos sensores y un determinado controlador. Los sensores de pH, presión y nivel se utilizarán únicamente para tener un monitoreo constante del sistema, es decir, si tenemos un valor de pH fuera del rango establecido, se encenderá una alerta que indique al usuario la anomalía y así este pueda llevar a cabo una acción correctiva. El sensor de nivel SN2 tiene la tarea de verificar que no ocurra un sobrellenado, si esto llega a suceder, este sensor será el medio para activar una alarma y un indicador que nos hagan saber la anomalía. El sensor de nivel SN1 es el medio para activar la electroválvula E5 que se encuentra en la salida del efluente, es decir cuando el sustrato llegue al nivel donde se colocará éste sensor, se activará E5 y liberará el sustrato. En cuanto al sensor de presión SP se refiere, este se encargará de sensar la presión producida por el biogás generado en el proceso, y así, activar o desactivar desde el controlador

la electroválvula E4 según sean los valores de presión, y liberar el gas hacia un depósito externo, y si llegase a existir una sobrepresión, podremos saberlo mediante la activación de la alarma y de un indicador.

El sensor de temperatura ST es una parte fundamental del sistema de calentamiento, ya que por medio de éste elemento se pretende mantener esta variable dentro de en los valores deseados, por lo que éste dispositivo es esencial para mantener funcionando el prototipo adecuadamente. Por último, se incluye una válvula manual, esta se instalará con el propósito de tener un desalojo completo del sustrato si es que se requiere llevar a cabo un mantenimiento, ya sea limpieza, reparación o sustitución de algún componente.

Reactor

Una vez planteadas las ecuaciones necesarias para determinar el valor máximo de presión interna permisible, se toman datos de las propiedades del material a utilizar; éstos son tomados del código ASME (Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos). En este caso se utiliza una placa de acero inoxidable SA-240 grado 316 con un espesor de 0.375 in, con un valor de esfuerzo del material igual a 18.8 PSI a una temperatura entre -20 a 200 °F.

Otro dato que se incluye es la eficiencia de la junta, el cual es 1 para una junta hecha a tope por cordón doble de soldadura o por otro medio con el que se obtenga la misma calidad de metal de soldadura depositada sobre superficies interiores o exteriores de la pieza. Este valor se aplica siempre y cuando la superficie soldada sea radiografiada totalmente. Una vez que tenemos estos datos calculamos la presión en cada una de las secciones, estas son sección inferior, sección media y sección superior, véase Tabla 4.1.

Sesión	$P = \frac{2 * 18800 \frac{lb}{in^2} * 1 * 0.375 in * \cos 30^\circ}{85.826 in - 0.8 * 0.375 in * \cos 30^\circ}$ $P = 25.3584 lb/in^2$
Media	$P = \frac{18800 \frac{lb}{in^2} * 1 * 0.375 in}{42.913 in - 0.4 * 0.375 in} = 164.8621 lb/in^2$
Superior	$P = \frac{2 * 18800 \frac{lb}{in^2} * 1 * 0.375 in * \cos 30^\circ}{85.826 in - 0.8 * 0.375 in * \cos 30^\circ}$ $P = 25.84 lb/in^2$
Presión Total	$P = 215.5789 lb/in^2$

Tabla 1. Tabla de presiones

El fluido contenido en el recipiente ejerce presión sobre las paredes del mismo. Cuando el fluido está en reposo, la intensidad de la presión en un punto es igual a todas direcciones hacia los lados y el fondo del recipiente varía según la altura del fluido respecto al punto que se esté considerando la presión, en [35] se tiene el dato de que un pie de agua produce una presión de 0.433 psi. Para determinar la presión máxima que puede generar el lodo se multiplica el nivel máximo al que llegaría el lodo por la altura en pies por 0.433 por la densidad del lodo. Tomando en cuenta que la altura máxima a la que puede llegar el lodo dentro del reactor es de 5.01 ft y una densidad de 0.0433 lb/in³, la presión se determina de la siguiente manera.

$$P = 5.01 * 0.433 * 0.0433 = 0.0939 lb/in^2$$

Esta presión se suma a la del diseño del recipiente, por lo que la presión total permisible para el reactor sería.

$$P = 0.0939 \frac{lb}{in^2} + 215.5789 \frac{lb}{in^2}$$

$$= 215.6728 \frac{lb}{in^2}$$

Y la presión máxima de operación a la que el reactor debe trabajar será.

$$P = 215.6728 \frac{lb}{in^2} - 30 \frac{lb}{in^2} = 185.6728 \frac{lb}{in^2}$$

La presión uniforme, interna o externa, induce en la estructura longitudinal un esfuerzo unitario igual al doble del que obra en la costura circunferencial, por la geometría misma del cilindro. El esfuerzo a la comprensión debido a la presión externa y el esfuerzo a la presión interna se determina mediante las ecuaciones de esfuerzo en cascos cilíndricos. Se calculan los valores para los esfuerzos máximos permisibles longitudinal y circunferencial, ya que el reactor contará con ambas juntas.

$$P = \frac{185.6728 \frac{lb}{in^2} * 85.6385 in}{4 * 0.375 in}$$

$$= 10743.57 \frac{lb}{in^2}$$

$$P = \frac{185.6728 \frac{lb}{in^2} * 85.6385 in}{2 * 0.375 in}$$

$$= 5371.78 \frac{lb}{in^2}$$

El volumen del reactor hasta donde se encuentra el sensor de nivel SN1 se calcula de la siguiente manera, donde se toma la altura del sensor nivel como referencia debido a que esta es la altura máxima a la que llegará el sustrato, antes de tener la apertura de la electroválvula E5.

$$\text{Sección cilíndrica: } V_{cl} = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

En dicha sección se cuenta con los siguientes datos:

$$r = 3.576 \text{ ft}$$

$$h = 3.507 \text{ ft}$$

$$V_{cl} = \pi * 3.576^2 * 3.507 = 140.916 \text{ ft}^3$$

Sección cilíndrico-cónica

$$V_{cc} = \frac{1}{3} \pi * h(R^2 + r^2 + R * r)$$

En esta sección los datos son los siguientes:

$$R = 3.576 \text{ ft}$$

$$r = 0.958 \text{ ft}$$

$$h = 1.512 \text{ ft}$$

Por lo que el volumen de la sección cilíndrico-cónica es:

$$V_t = 140.916 \text{ ft}^3 + 127.128 \text{ ft}^3 \\ = 168.048 \text{ ft}^3$$

Con base a los cálculos realizados anteriormente y a los valores obtenidos, el sistema cuenta con los requerimientos necesarios para operar con una carga de sustrato de 168 f³/día, además se considera que el material a utilizar es el adecuado ya que este cuenta con propiedades anti oxidables, lo cual evitará que el sustrato genere oxidación del material y a la vez se evade la afectación del proceso microbiológico debido a posibles oxidaciones. Por otra parte, si observamos los valores del esfuerzo permitido, podemos mencionar que se espera que la presión máxima a la que trabajará el sistema no afectará la estructura del mismo.

Las bombas B1 y B2 a utilizar, serán bombas peristálticas serie AMP-16/B, las cuales son totalmente selladas y su única parte de desgaste es el tubo de salida.

Se utilizarán válvulas solenoides 2 vías modelo W-210-0 normalmente abiertas y normalmente cerradas, estas serán del tipo anti retorno. Las electroválvulas E1, E2, E3 y E5 son normalmente cerradas, y estas se activarán para permitir el paso del sustrato en sus respectivas posiciones. En cuanto a la válvula E5, se utilizará una válvula solenoide de alta presión modelo YSE-020 normalmente cerrada, se utiliza para gas, agua y líquidos de baja presión. Para mantener un sistema de mezclado constante se ha elegido una bomba de refuerzo para gas y aire este tipo de dispositivos son utilizados para impulsar gases a una presión más alta, la cual puede ser regulada, por lo que es ideal para succionar el gas producido en el proceso e inyectarlo en la parte inferior del reactor. Tomando en cuenta las necesidades de este elemento, se ha elegido una válvula de acero inoxidable de 8 in de diámetro, serie 152/302, esta es una válvula de bola de 2 piezas, paso completo, provista de sellos de grafoil y de un 64 labio metálico que funciona como un sello secundario. Otra característica de vital importancia en este dispositivo es que, puede trabajar con presiones de hasta 450 psi. Se eligió un calentador de recirculación, ya que este cuenta con bridas con roscado para adaptarse a recipientes a presión y tiene la característica de calentar gases y líquidos que fluyen, a través de una resistencia que se encuentra instalada en el interior del calentador, además se puede emplear en cualquier sistema de circulación natural o forzada por bombeo. Para el acondicionamiento de la señal del sensor LM35, se ha diseñado un circuito para amplificar la señal, para poder realizar este circuito se utilizó el amplificador operacional LM358N. Se muestra el diseño y los cálculos realizados. Tomando en cuenta que el LM35 entrega una señal de 10 mV/°C y que tiene una precisión de 1.4 °C, se diseña un amplificador operacional

con una ganancia de 10 para aumentar su precisión a 0.14 °C. Sabiendo que la diferencia de voltaje a la salida del sensor es de 1 V a 100 °C, ya que el voltaje máximo que soportan las entradas análogas del controlador es de +/- 10 V, de manera que la ganancia se calcula de la siguiente manera.

$$G = \frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{10v}{100mv} = 10$$

Y el consumo de corriente del componente es bajo e independiente de la magnitud de la tensión de alimentación, para el diseño de este circuito únicamente se utilizó un operacional del LM358N. La ecuación que describe la amplificación de la señal es la siguiente.

$$V_{sal} = V_{ent} \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) = 10$$

Por lo tanto, para obtener la ganancia esperada de 10, la relación de los valores de las resistencias es la siguiente:

$$R2 = 9 * R1$$

Con base a lo anterior, se puede expresar la ecuación general que describe el acondicionamiento del LM35 de la siguiente manera:

$$V_{sal2} = 10 * V_{ent}$$

En la Figura 2, se muestra el circuito esquemático utilizado para la amplificación de la señal proveniente del LM35, se puede observar que el voltaje de alimentación para el LM358N es de 9 VCD, el cual es el voltaje de saturación, lo que nos indica que la salida amplificada no superará este valor y así se evitan posibles daños a la DAQ.

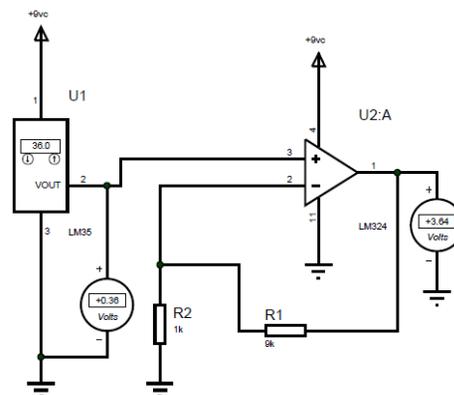


Figura 2. Circuito de acondicionamiento para el sensor LM35

Para llevar a cabo el monitoreo de la presión interna dentro del reactor, se ha elegido un sensor de presión de la marca Keyence AP-C33KP, este dispositivo trabaja con presiones de hasta 145 psi, y puede ser utilizado para presión de aire o gases no corrosivos. Para mantener un control en el nivel de lodo dentro del reactor, se ha elegido un sensor capacitivo marca Nohken serie R7, este dispositivo tiene la ventaja de poder trabajar en ambientes que contengan líquidos, polvos, pastas y gránulos. Además, tiene la cualidad de poder ser montado en atmósferas explosivas con presencia de gases o sólidos en suspensión. Como ya se mencionó anteriormente, se utilizarán dos sensores de nivel, SN1 Y SN2, el primero para liberar el efluente cuando sea necesario y el segundo para activar la alarma si llegase a existir una sobrecarga de sustrato. En base a que nuestra DAQ únicamente soporta 5 VDC en sus entradas digitales, se utilizará un regulador de voltaje 7805 para reducir los 24 VDC que el sensor envía al ser activado, y así evitar algún daño a nuestro controlador. Para llevar a cabo el monitoreo del pH se eligió como medio de medición un electrodo ISFET Ion Sensitive Field Effect Transistor, modelo CS525 de la compañía Campbell Scientific, el electrodo sumergible CS525 está diseñado para proporcionar una robusta, fiable y precisa medición la cual es totalmente compensada en temperatura. Este electrodo, además de incluir la tecnología ISFET, contiene un sistema de

referencia de cloruro de potasio y plata. El diseño ISFET reduce considerablemente el número de errores en ácidos alcalinos en condiciones extremas de pH. Este elemento de detección es accionado por un circuito electrónico que está integrado en la parte superior del electrodo. Para realizar la etapa de potencia de este proyecto, se eligió un módulo de 8 relevadores, en la Figura 3 se muestra una topología individual del circuito de accionamiento de cada uno de los relevadores, como se puede observar este dispositivo cuenta con una terminal para alimentar el módulo desde una fuente externa de 5 V, lo que evita daños en el controlador por exigencia de voltaje en cada una de sus salidas. Lo que nos permite accionar el optoacoplador con un mínimo voltaje recibido desde el controlador para posteriormente activar el relevador y permitir el paso de voltaje para encender el actuador.

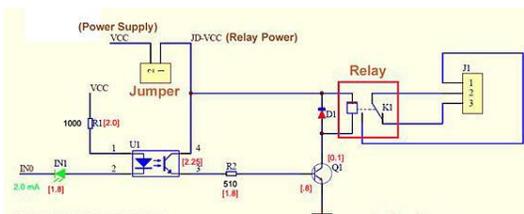


Figura 3. Circuito de accionamiento del módulo.

Para este proyecto se emplea una interfaz de control realizada en LabVIEW en la que permite controlar la tarjeta 1208FS desde el módulo ULX.

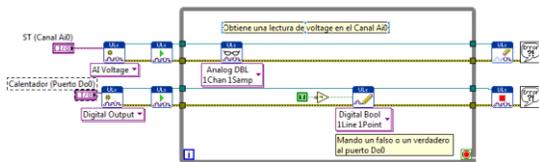


Figura 4. Comunicación con DAQ

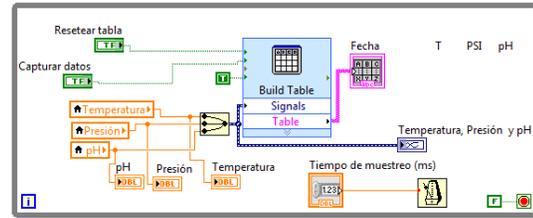


Figura 5. Captura de datos

Análisis de temperatura y accionamiento del sistema recirculación

Para llevar a cabo esta prueba, se establecen distintos rangos de temperatura dentro de la interfaz, posteriormente se somete el sensor LM35 a distintos cambios de temperatura y se analiza el comportamiento del mismo. Dentro de la interfaz se han establecido dos controles numéricos, en los cuales el usuario debe ingresar el valor mínimo y máximo de temperatura respectivamente, esto con la finalidad de activar los actuadores que componen el sistema de recirculación E2, E3 y B2 del sustrato para mantener la temperatura dentro del rango deseado, se realizan pruebas con tres distintos rangos de temperatura.

a) Prueba para un rango de 20 °C a 50 °C, en la cual se toma una muestra cada 2.5 segundos.

Se tiene una temperatura de inicio de 29.4 °C, la cual está dentro del rango establecido, posteriormente se somete el sensor a un enfriamiento ascendente y al llegar a temperatura a un valor ≤ 20 °C, el actuador es accionado, luego el sensor se somete a un calentamiento progresivo hasta que la temperatura sea ≥ 0 °C, lo que provoca que el actuador sea desactivado, y permanecerá así mientras la temperatura no descienda nuevamente a 20 °C. En la Figura 6 se puede apreciar el comportamiento de este fenómeno. Como se puede observar en la Figura 5.1, se tiene una temperatura aproximada de 29 °C, al crearse un escenario para manipular esta variable, la temperatura comienza a descender hasta el punto deseado, posteriormente esta aumenta hasta 50 °C aproximadamente, que es

el valor máximo que se ha establecido, detrás de este hecho la temperatura comienza a descender hasta acercarse al valor inicial.

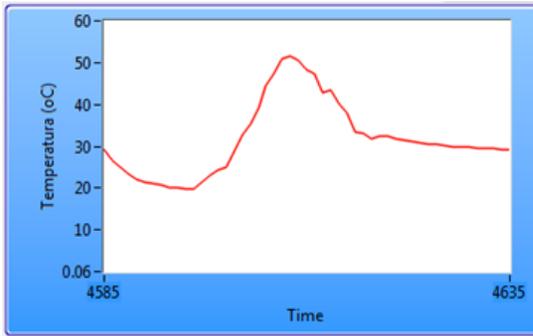


Figura 6. Muestreo de temperatura de 20 a 50 °C

b) Prueba para un rango de 25 °C a 40 °C, en la cual se toma una muestra cada 1.5 segundos

Se puede apreciar que el actuador se acciona al descender la temperatura al valor mínimo establecido y permanece en ese estado hasta que la temperatura llega al valor máximo establecido. En la Figura 7, se aprecia como la temperatura comienza a descender al crear un escenario de enfriamiento del sensor, después esta comienza a ascender lentamente hasta que se crea un escenario de calentamiento, lo que provoca que esta se eleve rápidamente, finalmente se retira el medio de calentamiento y la temperatura tiende a disminuir lentamente hasta aproximarse a el valor inicial.

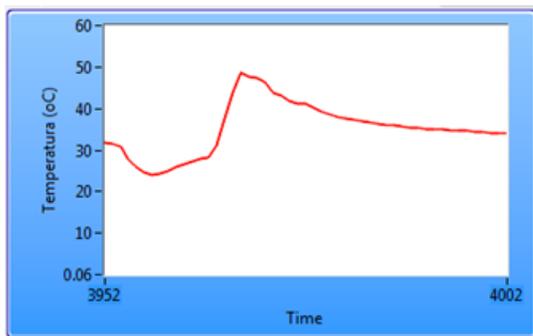


Figura 7. Temperatura para un rango de 25 a 40 °C.

c) Prueba para un rango de 25 °C a 35 °C, en la cual se toma una muestra cada 1.5 seg.

Al igual que en las pruebas a y b, Se aprecia que el actuador se activa cuando la temperatura llega al valor mínimo y se desactiva al llegar al valor máximo, esto nos indica que es posible mantener esta variable dentro del rango que el usuario establezca desde la interfaz de control. Al analizar la gráfica de la Figura 8, se puede indicar que la conducta de la temperatura mejoró considerablemente al utilizar un rango de temperatura más estrecho, lo que es bastante favorable ya que la digestión anaerobia mejora notablemente en un rango de temperatura de 37 °C a 40 °C.

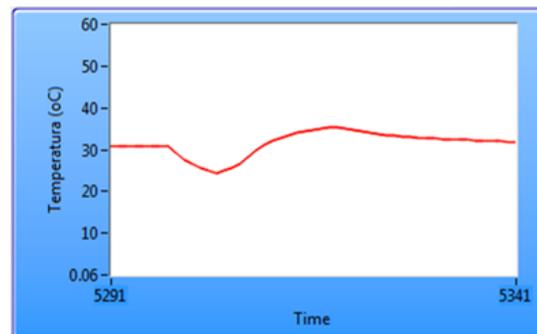


Figura 8. Temperatura de 25 a 35 °C

a) Análisis de presión en un rango de 60 psi a 85 psi.

En este análisis se adquiere una muestra de presión cada 5 segundos, como se puede percibir en la figura 9 se tiene un valor inicial de 76.3 PSI, al simular un aumento de presión por medio del compresor, se observa como esta comienza a ascender progresivamente y el actuador se mantiene desactivado hasta que la presión es ≥ 85 PSI que es el valor máximo de presión que se ingresó en la interfaz de control, lo que provoca que el actuador se active, hecho que representa el encendido de E4 para liberar el gas producido dentro del reactor a un depósito externo, luego se comienza a desalojar el aire dentro del compresor por medio de una válvula manual hasta tener un valor ≤ 60 PSI provocando que el actuador sea desactivado. En la Figura 5.4 se puede observar que la presión se mantiene en un valor de 76 PSI aproximadamente antes de encender el compresor, posteriormente en cierto tiempo

podemos ver como la presión comienza a ascender hasta llegar al punto máximo de referencia, seguido de este hecho se aprecia que la presión comienza a descender una vez que se libera el aire comprimido dentro del compresor, esta desciende hasta llegar a el valor mínimo de referencia. Debemos mencionar que esta prueba se llevó a cabo mediante la manipulación de la presión con la finalidad de verificar la activación y desactivación del actuador encargado de mantener la presión en un determinado rango.

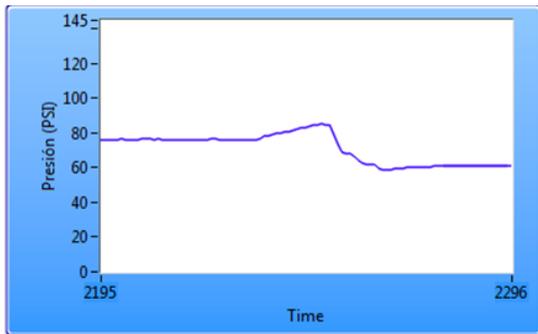


Figura 9. Representativa de la presión en primer análisis de presión.

b) Análisis de presión en un rango de 50 psi a 70 psi.

En la Figura 10 se tienen los resultados adquiridos durante este ensayo, básicamente se tiene un comportamiento muy similar al de la prueba anterior, solo que, con un rango de presión distinto, donde la conducta del actuador respondió favorablemente a los valores establecidos en la interfaz de control. Lo que nos lleva a respaldar el buen desempeño del sistema.

En la Figura 10 se aprecia la señal generada por el sensor de presión, la cual es muy similar a la obtenida en el primer ensayo, lo cual nos indica un buen comportamiento en el dispositivo cuando este es sometido a distintos cambios de presión.

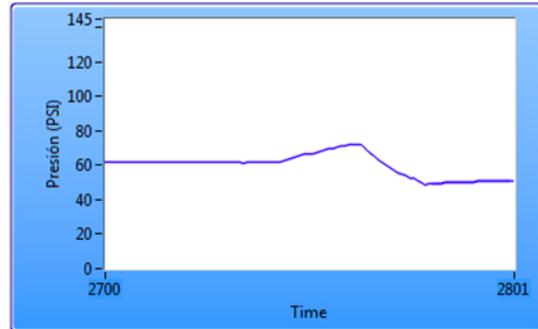


Figura 10. Representativa de la presión en segundo análisis de presión.

c) Análisis de presión en un rango de 35 psi a 62 psi.

En el tercer ensayo se tomó una muestra cada 5 segundos, los datos generados se muestran en la Figura 11 y al igual que en las dos pruebas anteriores los resultados fueron aceptables, ya que el actuador respondió perfectamente al nuevo rango de presión establecido. En la Figura 11 podemos observar nuevamente el comportamiento del sensor durante la tercera prueba, donde este es muy parecido al de las pruebas realizadas anteriormente, podemos concluir que el sensor tiene un buen comportamiento en distintos valores de presión y además es lineal, lo que puede respaldar un buen monitoreo de la presión generada dentro del reactor anaerobio y un buen control de la misma mediante el desalojo del gas mediante el actuador E4.

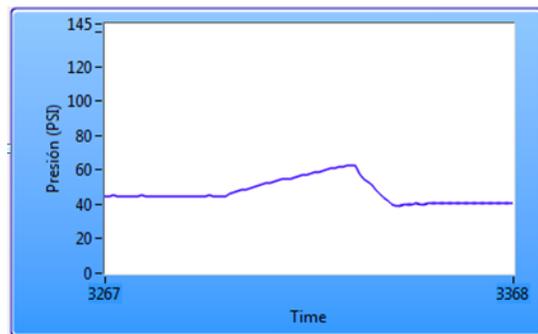


Figura 11. Representativa de la presión en tercer análisis.

Durante las pruebas realizadas anteriormente se simuló el funcionamiento de la electroválvula E4 mediante una válvula manual, se observó

que la presión desciende considerablemente rápido durante la apertura de esta.

Análisis de pH

Se eligió un electrodo tipo ISFET para llevar a cabo el monitoreo del pH dentro del reactor, este dispositivo tiene la ventaja de proporcionar una salida de 0 a 5 VDC que representa un rango de pH de 0 a 14. Por lo que para simular el comportamiento de este elemento se suministrarán y se manipularán 5v a la DAQ los cuales se convertirán en valores de pH dentro del programa de la interfaz de control.

Análisis de pH en un rango de 6 a 8.

En el ensayo anterior se estableció un rango de pH de 6 a 8 para verificar el accionamiento de la alarma si el pH toma un valor fuera de este rango, la función de esta parte del sistema es solo monitorear esta variable y alertar al usuario cuando exista algún valor fuera de lo establecido. En la Figura 12 se puede apreciar el comportamiento de la señal generada, donde se tiene un valor inicial de 7.2 aproximadamente, luego de cierto tiempo esta comienza a incrementarse hasta llegar a 8 unidades, posteriormente desciende a 6 unidades y asciende nuevamente hasta el valor inicial, tiempo de muestreo es de 3.5 seg.



Figura 12. Representativa del pH en primer análisis.

a). Análisis de pH en un rango de 6.5 a 7.5.

Podemos decir que el comportamiento es similar al de la primera prueba, únicamente se estableció un nuevo rango y el tiempo de muestreo se redujo a 2.5, donde el actuador respondió positivamente a la variación de pH.

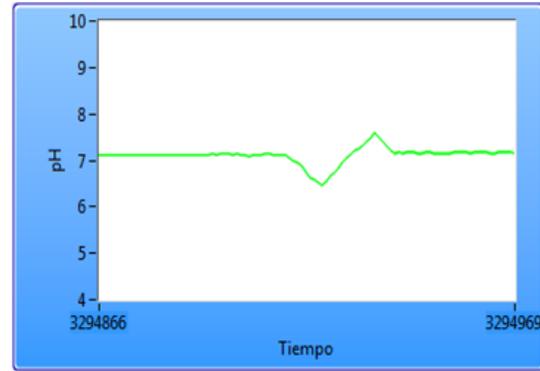


Figura 13. Representativa del pH en seg. análisis.

c) Análisis de pH en un rango de 6.8 a 7.2.

En la tercera prueba se establece el rango en el cual deberá operar el reactor, nuevamente el controlador se comportó positivamente a la hora de activar o desactivar el actuador. Se puede apreciar que en esta ocasión la alarma se activó en varias ocasiones, con base a este hecho y a que estabilizar el pH lleva tiempos prolongados, se ha decidido incluir una alarma independiente para alertar al usuario cuando el valor de pH esté fuera de rango, así como un control para desactivarla si el usuario así lo desea. En la Figura 14 se tiene la respuesta a la señal generada durante la tercera prueba. Nuevamente se tiene un buen comportamiento de esta. Lo que nos lleva a concluir que el sistema para adquirir el valor de pH funciona correctamente, debemos mencionar que se utilizó un voltaje de referencia similar al que generaría el electrodo a utilizar, y no podemos tener la certeza de que el comportamiento será idéntico, pero sí podemos decir que este podría asemejarse considerablemente debido a las especificaciones del electrodo.



Figura 14. Representativa del pH en tercer análisis.

Prueba de sensores de nivel S1 y S2

En base a que S1 y S2 son sensores capacitivos digitales, estos dispositivos fueron sometidos a constantes ensayos, colocando distintos objetos en su área de detección para verificar su funcionamiento. Se probó S1, sensor que tiene la tarea de mandar la señal al controlador para activar la electroválvula E5 para desalojar el sustrato cuando sea necesario, donde al ser sometido a presencia en repetidas ocasiones este se comportó aceptablemente, al igual que el controlador y el actuador. Seguido de este hecho, se realizó el mismo procedimiento para S2, sensor que tiene la función de detectar un sobrellenado si este llegase a ocurrir, su comportamiento fue aceptable ya que no hubo fallas durante las pruebas a las que fue sometido.

Prueba de sistema de potencia para calentador, bomba B1, bomba B3 y electroválvula E1. En este ensayo se pone a prueba el sistema de potencia y la interfaz de

control para verificar el buen funcionamiento de ambos, dentro de la interfaz se cuenta con un botón de encendido y apagado para calentador, el cual se activó y desactivo repetidamente durante cierto tiempo, y el sistema de potencia respondió positivamente en todas las ocasiones. Se debe mencionar que el calentador se mantendrá encendido permanentemente durante el funcionamiento del proceso ya que este se encargará de acondicionar la temperatura del sustrato antes de entrar al reactor.

Para B1, se realizó el mismo procedimiento, se probó repetidamente el accionamiento y des accionamiento del sistema de potencia desde la interfaz, el resultado fue positivo ya que no se tuvo ninguna inconveniencia durante el proceso. Se utilizó el mismo relevador para ambos ya que estos actuadores trabajarán en conjunto para suministrar el sustrato al reactor. En esta etapa del sistema B1 se encarga de proveer determinada cantidad de sustrato ya que cuenta con un regulador manual de caudal, y E1 permite el paso del caudal del sustrato y a la vez evita que este regrese si llegase a ocurrir algún problema con B1, debido a que es una electroválvula anti retorno. Por lo que es de vital importancia mantener un control automático en ambos dispositivos.

También se puso a prueba el control de B3, que es la bomba que se encargará de recircular el gas para el sistema de mezclado, al igual que en los actuadores anteriores se realizó una prueba similar y no se tubo falla en el sistema.

Conclusiones

Es importante mencionar que, al utilizar el material seleccionado para su construcción, emplear el tipo de junta que se especificó y respetar la máxima presión interna permisible. Se espera que el reactor opere confiablemente

una vez que sea sometido al proceso para el que fue diseñado.

El sistema de adquisición de datos podemos mencionar que se obtuvo un monitoreo aceptable en la temperatura, presión

y niveles, ya que durante las pruebas realizadas los sensores se comportaron favorablemente ante los distintos escenarios que se crearon. Por otra parte, el sistema de potencia funcionó aceptablemente durante las pruebas realizadas para verificar el buen funcionamiento del mismo. En cuanto al sensor de pH se refiere, aunque este fue simulado respetando las

especificaciones del mismo, no se puede garantizar un buen funcionamiento de esta parte del sistema ya que no se contó con el dispositivo, y lógicamente no se llevó a cabo la medición de sustancias con un valor de pH específico para demostrar el funcionamiento del electrodo.

Referencias

- [1] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2009), Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. Edición 2009, México, SEMARNAT, 167p.
- [2] IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), Biomasa: Digestores anaerobios, Madrid, España, Octubre 2007.
- [3] Garcia C., Molina F. y Roca E., Multi-objective cascade controller for an anaerobic digester, *Process Biochemistry*, Vol. 46, Issue 4, Abril 2011, p-p 900-909, ISSN 1359-5113.
- [4] Alastair J. Ward, Phil J. Hobbs, Peter J. Holliman, David L. Jones, Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources, *Bioresource Technology*, Volume 99, Issue 17, November 2008, p-p 7928-7940, ISSN 0960-8524.
- [5] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), (Julio de 2012), Población: Chihuahua, Disponible [En línea]: <http://www.inegi.org.mx/>
- [6] Sogari Noemí, (Septiembre 2012), Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos, Disponible [En línea]: <http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/cyt/2003/comunicaciones/07-Tecnologicas/T-027.pdf>
- [7] Peña M., Rustrian E. y Houbbron E., Ensayos de biodegradabilidad anaerobia automatizados, (Septiembre 2012), Disponible [En línea]: http://www.smbb.com.mx/congresos%20smbb/puertovallarta03/TRABAJOS/AREA_VII/CARTEL/CVII-46.pdf
- [8] Liu J, Olsson G, Mattiasson B. Monitoring and control of an anaerobic upflow fixed-bed reactor for high-loading-rate operation and rejection of disturbances. *Biotechnol Bioeng* 2004; 87:43–53.
- [9] Garcia C, Molina F, Carrasco EF, Roca E. Control of restart-up of anaerobic USBF reactors after short stops. *Ind Eng Chem Res* 2009
- [10] Steyer JP, Bernard O, Batstone D, Angelidaki I. Lessons learnt from 15 years of ICA in anaerobic digesters. *Water Sci Technol* 2006; 53:25–33.
- [11] Rodríguez A., Cabrera A. y Valencia J., Diseño y construcción de los instrumentos de medición para un biorreactor prototipo, *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, Vol. 24, No.1 marzo 2003
- [12] Cortés A. y Arenas O., Sistema de Control de Temperatura para Incubadora Avícola con Control Difuso y la Plataforma LabVIEW, Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad de Ingeniería Eléctrica, Zacatecas, Zacatecas, México, Diciembre 2011.
- [13] Zaragoza I., Gómez Y, y Cabrera A., Diseño y Construcción de un Prototipo de Incubadora Controlado por Lógica Difusa, Congreso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica, La Abana, Cuba, Mayo de 2005.
- [14] O. Infante et al., Control de Temperatura para Incubadora de Neonatos con Alarmas y Comunicación para Control Supervisorio, *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, vol. 32, no 2, pp. 387-395, 1992.
- [15] Alzate E., Montes J. y Escobar R., Acondicionamiento del Sensor de pH y Temperatura para realizar titulaciones potenciométricas.
- [16] Werner U., Stöhr U., et al. *Biogas Plants in Animal Husbandry*, Friedr. Vieweg & Sohn, 1989.
- [17] McKinney R., *Microbiology for sanitary engineers*, McGraw-Hill, 1986.
- [18] Poggio D., Diseño y construcción de dos biodigestores en el altiplano peruano, Tesis de maestría,

Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Física e Ingeniería Nuclear, España, Marzo 2007.

[19] Chae K., Jang A., Yim S, The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure, *Bioresource Technology*, Vol. 99, pp. 1-6, Enero 2008.

[20] Mosey, F. y Fernández, X., 1989. Patterns of hydrogen in biogas from the anaerobic-digestion of milk-sugars. *Water Science and Technology* , Vol 21. pp. 187–196, 1998.

[21] Sandberg M. y Ahring, B., Anaerobic treatment of fish-meal process wastewater in a UASB reactor at high pH, *Applied Microbiology and Biotechnology* Vol. 36, 1992

[22] Luostarinen, S., (September 2012), Anaerobic on site wastewater treatment at low temperature, University of Jyväskylä, Disponible [En línea]: [http://dissertations.jyu.fi/studbiol/951392274X.pdf]

[23] Karim K., Hoffmann R. y Klasson T., Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing, *Water Research*, Vol. 39, pp. 3597-3606, September 2005.

[24] Gómez X., Cuetos M. y Cara J., Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes: Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate, *Renewable Energy*, Vol. 31, pp. 2017-2024, October 2006.