

# SISTEMA DE EVALUACION Y CONTROL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EMPLEANDO LOGICA DIFUSA

C. León, F.J. Molina, F.J. Romero, J.M. Gómez

Dpto. Tecnología Electrónica  
E.U.P., Universidad de Sevilla  
C/ Virgen de Africa 7  
41011 Sevilla

## Resumen.

Este trabajo expone los resultados obtenidos en el desarrollo de un sistema basado en lógica difusa enfocando al control del tratamiento de aguas residuales. El mencionado sistema, basado en PC, incluye un algoritmo de control, implementado mediante lógica difusa, para el control del proceso de depuración anaerobia de aguas residuales, a partir de datos obtenidos mediante sensores por un autómatas industrial (PLC), así como también un completo entorno de evaluación de nuevas estrategias de control que contemple parámetros inicialmente no previstos, siendo esta su característica más destacable.

## 1. Introducción.

En los últimos años puede observarse una creciente aplicación de los conceptos de la lógica difusa al control de procesos que, o no son lo suficientemente conocidos, o bien presentan un modelado matemático demasiado complejo, que los hace intratables a partir de una aproximación clásica [1], [2] y [3]. Por otro lado, la gestión de aguas residuales es un aspecto de evidente futuro desde el punto de vista de la automatización. Este trabajo se enmarca dentro de ambos entornos, mostrando una aplicación del control basado en lógica difusa al caso del tratamiento de aguas residuales. A lo largo del mismo se comenzará describiendo el proceso a controlar por el sistema propuesto, para continuar con una descripción de los objetivos a alcanzar y las ventajas de la aproximación propuesta, finalizando con la exposición de los resultados obtenidos.

## 2. El problema: la depuración anaerobia

En una depuradora de digestión anaerobia, los sólidos orgánicos procedentes de las aguas residuales se descomponen en ausencia de oxígeno gracias a la acción de dos grupos bien diferenciados de bacterias, que coexisten en el mismo medio: *bacterias formadoras de ácidos*, que convierten los sólidos complejos en sólidos más simples, llamados ácidos orgánicos, además de producir anhídrido carbónico, hidrógeno y agua, y *bacterias formadoras de metano*, que convierten los

ácidos procedentes de las anteriores en metano, anhídrido carbónico, hidrógeno y agua, fundamentalmente [4].

En general, se considera que un digester funciona correctamente cuando la reducción de materia orgánica en el efluente está entre un 40% y un 60% del existente en el influente. Para lograrlo, se debe controlar el digester, de tal forma que las reacciones de formación de ácidos y las de formación de metano se encuentren en equilibrio. Esto se puede conseguir mediante el control de parámetros tales como:

1. *Suministro de alimento* (sólidos orgánicos) al digester, que debe realizarse de forma continua.
2. *PH*, cuyo rango óptimo está comprendido entre 6.8 y 7.5.
3. *Relación de ácidos volátiles/alcalinidad* dentro del digester, precisándose valores de alcalinidad superiores a 1000 mg  $\text{CO}_3\text{Ca}$ / litro para tener suficiente capacidad tampón, y conseguir que el digester sea estable.
4. *Producción de biogas* (metano,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$  y  $\text{SH}_2$ ); composición del biogas (expresada en % de  $\text{CO}_2$ ), que al ser un parámetro de respuesta rápida y fácil de analizar puede tomarse como índice de la estabilidad del

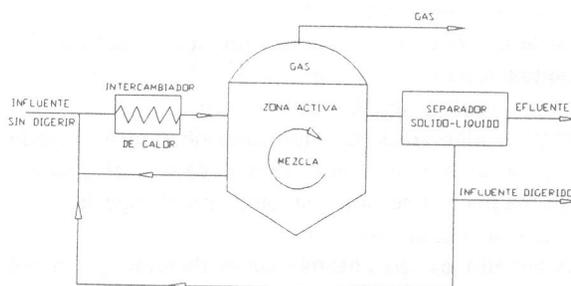


Fig. 1. Digester anaerobio.

sistema.

5. *Potencial redox*, ya que las reacciones fundamentales del proceso anaerobio son de oxidación/reducción.

6. *Temperatura*, pues los mecanismos metabólicos de las bacterias dependen de ella (idealmente habría de ser de 37°C).

En el caso del sistema objeto de esta comunicación, el proceso anteriormente descrito se lleva a cabo en un digestor anaerobio experimental de 8 litros de capacidad, correspondiendo 7 litros al digestor principal y 1 litro al separador sólido-líquido (Fig. 1).

Con anterioridad a la implantación del sistema propuesto, el proceso de depuración era controlado a través de un autómata programable industrial, capaz de gobernar los cinco motores colocados en el sistema, cuyas misiones resultan ser:

1. *Agitación*: impulsión del influente a través de un circuito de agitación, lo que genera el grado de mezcla necesario para homogeneizar tanto la temperatura como los nutrientes en el fango biológico.
2. *Alimentación*: mantenimiento de la alimentación continua de nutrientes.
3. *Recirculación*: que impulsa el fango desde el fondo del separador al digestor.
4. *Impulsión de agua caliente* hacia el intercambiador de calor.
5. *Salida de agua limpia* del separador sólido-líquido.

El algoritmo de control se basaba en una temporización sujeta a un ciclo de una hora. En el transcurso de la misma, eran activadas las diferentes bombas que controlan los procesos anteriormente descritos.

### 3. Objetivos y ventajas del Sistema de Evaluación y Control basado en lógica difusa.

El sistema que se propone pretende realizar las siguientes tareas:

1. Implementación de un algoritmo de control, basado en lógica difusa, a partir de los datos del proceso obtenidos por los sensores situados en el digestor.
2. Desarrollo de un entorno de evaluación y control basado en PC, que, a partir de los datos procedentes de los sensores, almacenados en una base de datos dentro del autómata, y transmitidos vía RS-232, permita evaluar la efectividad de nuevas reglas difusas, capaces de

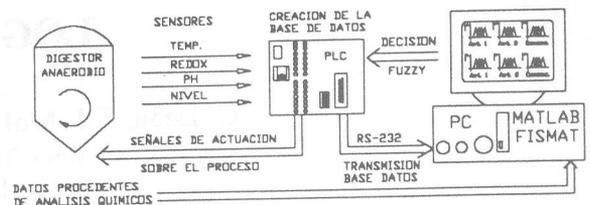


Fig. 2. Sistema de evaluación y control basado en lógica difusa.

incluir parámetros del proceso que inicialmente no se han tenido en cuenta, bien por desconocer su utilidad, bien por no estar instalados sensores capaces de captarlos en continuo.

El entorno desarrollado se basa en el programa *Matlab* y en el sistema de inferencia borrosa *Fismat* [5], y en el se muestran gráficamente los distintos parámetros de control en función del tiempo de cara a la evaluación de la importancia de cada uno de ellos. El mencionado entorno permite, así mismo, generar las funciones de pertenencia y reglas necesarias para la inferencia borrosa.

Entre las ventajas de una aproximación de este tipo pueden destacarse:

1. A diferencia de un módulo de lógica borrosa para PLC's, el entorno descrito permite trabajar con antecedentes que no han sido obtenidos mediante sensores, como los contenidos en la base de datos, sino que el usuario introduce por teclado. Esto puede resultar de gran utilidad para los químicos que trabajan en el proceso de digestión anaerobia, permitiéndoles crear sus propias reglas y funciones de pertenencia, evaluar el impacto de las decisiones de control sin actuar directamente en el digestor, establecer correlaciones entre los datos e introducir resultados que ellos mismos obtienen mediante el análisis químico.
2. No es preciso conocer el manejo de *Matlab* ni de ninguna herramienta de programación para lógica difusa, sino que basta conocer el entorno de presentación que se ha generado.

### 4. Descripción del sistema desarrollado.

La estructura propuesta para alcanzar los objetivos marcados puede verse en la Fig. 2, en la que encontramos los distintos elementos que intervienen en el sistema: digestor anaerobio, autómata programable (PLC) y PC.

El PLC genera una base de datos con las lecturas de sus

entradas analógicas (PH, REDOX y T<sup>a</sup>), con un período de muestreo de 15 minutos. Estos datos son almacenados junto con su fecha y hora, siendo renovados cada 7 días. Antes serán recogidos por el PC.

Además, el PLC realiza las tareas de control sobre las distintas bombas del sistema. Este programa de control se rige por unas consignas de control que definen el tiempo de actuación de cada una de las bombas instaladas en el digestor (Bombas de alimentación, agitación, recirculación y salida). De esta forma el sistema de control borroso instalado en el PC actuará sobre el proceso cambiando estas consignas de control, que vienen expresadas en % y corresponden al tiempo relativo de funcionamiento sobre una base de tiempos que se ha fijado en una hora.

Entre las variables de entrada para el sistema de control hay que distinguir dos grupos:

- Medidas en tiempo real: PH, Redox y Temperatura. Son medidas por el PLC y transferidas al PC.
- Introducidas por teclado: Alcalinidad, Concentración de ácidos grasos volátiles, %CO<sub>2</sub>. Son resultados de análisis químicos.

#### 4.1. Entorno de presentación.

El PC ofrece un entorno de presentación de fácil utilización por parte del usuario, que permite las siguientes tareas:

1- Desarrollo de un sistema de control borroso: para ello se debe definir un grupo de variables y sus etiquetas borrosas, con forma trapezoidal o triangular. Después se escogerán entre ellas hasta un máximo de 8 antecedentes y 4 consecuentes, y se definirá un conjunto de reglas. MATLAB generará una serie de matrices que contienen la información necesaria para la inferencia borrosa.

2- Proceso de inferencia: una vez generada esta información, MATLAB está dispuesto para tomar decisiones de evaluación y control. La inferencia se realiza según el método de Mandani, y la desborrosificación mediante el cálculo del centro de gravedad ( el sistema está abierto a introducir cualquier otra opción en ambos casos).

Se dispone de varias opciones:

- Pantalla de simulación: aquí se pueden introducir valores arbitrarios de las variables de entrada y observar la respuesta del sistema de inferencia, que nos informa además de los grados de activación de cada regla y la forma gráfica de la salida borrosa.

- Pantalla de evaluación: el sistema muestra del estado en

Nº DE REGLAS	10	20	30	50	70
TIEMPO (seg.)	.32	.43	.54	.76	.96

Tab. 1. Evaluación de tiempos de inferencia.

que se encuentra el digestor.

El tiempo invertido en la inferencia, para un caso típico de 2 variables de entrada y 1 de salida es del orden mostrado en la Tab. 1, en función del nº de reglas. Para el digestor anaerobio, la evolución del proceso es relativamente lento y este tiempo es suficiente.

3. Gráficos de tendencia: Con esta utilidad, también desarrollada en MATLAB, se pueden visualizar e imprimir las curvas de evolución temporal de las distintas variables del proceso.

4. Captura de datos y envío de consignas: Un programa desarrollado en lenguaje C se encarga de administrar el protocolo de comunicación con el autómata para permitir extraer la base de datos contenida en el PLC y ofrecerla a MATLAB en su formato de matriz, así como enviar al PLC las consignas de control inferidas.

#### 4.2. Reglas de control borroso.

Las reglas de control pretenden recoger la experiencia existente sobre el control del proceso de digestión anaerobio. Como ejemplo, se puede considerar el siguiente caso:

ESTADO: Cuando el %CO<sub>2</sub> aumenta "bastante" indica que la actividad de las bacterias formadoras de ácido es demasiado elevada y los ácidos producidos no están siendo digeridos por las bacterias formadoras de metano.

ACCIONES: Se hace necesaria una actuación encaminada a disminuir la acidez del fango biológico mediante diversas acciones que son:

- reducir la alimentación de materia orgánica al reactor primario.

- recircular al reactor primario fango activo (rico en bacterias formadoras de metano), depositado en el separador sólido-líquido.

Las reglas que codifica esta situación puede verse en la tabla 2.

Antecedentes SI...	Consecuentes ENTONCES...	
% CO es alto	Alimentar poco	Recircular bastante
% CO es muy alto	Alimentar muy poco	Recircular mucho

Tab. II. Ejemplo de una regla de control.

## 5. Conclusiones.

El sistema presentado demuestra la viabilidad de la aplicación de la lógica difusa al control de una depuradora de aguas residuales.

La principal aportación del prototipo propuesto radica en el entorno de evaluación, que permite la prueba de nuevas estrategias de control, que podrían no estar contempladas en el momento de la primera puesta en marcha del sistema, así como la evaluación del comportamiento del mismo. Además de lo anterior, cabe destacar el carácter abierto del entorno, que puede ejecutarse en cualquier ordenador tipo PC de gama media, con resultados satisfactorios en cuanto a velocidad de ejecución respecto a los tiempos de respuesta de un proceso del tipo controlado. Otro aspecto a tener en cuenta la generalidad del sistema, al ser aplicable a cualquier proceso susceptible de ser controlado mediante lógica difusa.

En un futuro próximo los esfuerzos se dirigirán al desarrollo de un protocolo de pruebas que garantice la viabilidad del control efectuado.

## 6. Referencias.

- [1] R. Reyero y C. F. Nicolás. Sistemas de Control Basados en Lógica Borrosa: "Fuzzy control". Omron Electronics S. A. Centro de Investigaciones Tecnológicas IKERLAN. 1995.
- [2] G. J. Klir. "Fuzzy Logic" *IEEE Potentials.*, pp 10-15, Oct/Nov., 1995.
- [3] B. K. Bose. "Expert System, Fuzzy Logic and Neural Network Application Power Electronic and Motion Control". *Proceedings of the IEEE.*, vol. 82, nº. 8, Aug. 1994.
- [4] M. Delgado. Procesos Biológicos Anaerobios:

Digestión Anaerobia, Bioquímica y Microbiología. Grupo TAR. E.U.P. de Sevilla. 1995.

[5] A. L. Zadeh. Fuzzy Inference Systems toolbox for MATLAB: FISMAT. Dpt of Electrical and Computer Engineering. University of Queensland. Australia. 1995.