

# CONTROL ROBUSTO DE PROCESO ATAD PARA MEJORAR LA CALIDAD DE FANGO TRATADO

S. Nájera

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de La Rioja, 26004 Logroño, España.

E-mail: [silvano.najerac@unirioja.es](mailto:silvano.najerac@unirioja.es)

M. Gil-Martínez <sup>(1)</sup>, J.A. Zambrano <sup>(1)</sup>, I. Irizar <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de La Rioja, 26004 Logroño, España.

E-mail: [montse.gil@unirioja.es](mailto:montse.gil@unirioja.es), [jesus-alberto.zambrano@unirioja.es](mailto:jesus-alberto.zambrano@unirioja.es)

<sup>(2)</sup> CEIT y TECNUN, Universidad de Navarra, 20018 San Sebastián, España

E-mail: [iirizar@ceit.es](mailto:iirizar@ceit.es)

## Resumen

*Este artículo presenta una nueva estrategia robusta de control de procesos ATAD cuyo objetivo persigue maximizar el cumplimiento de los criterios de estabilización e higienización de fangos que establece la normativa con el mínimo gasto energético de inyección de aire. Se asegura la estabilidad y el performance de la evolución de la temperatura media en el interior del digestor mediante un controlador lineal diseñado mediante técnicas robustas QFT. El sistema trabaja en un punto de operación específico y óptimo, determinado de forma no lineal por un generador de variables de referencia (temperatura media – caudal de aire). Éstas últimas se adaptan en línea, gracias a la supervisión de ocurrencia de codos en la temperatura instantánea dentro de un batch.*

**Palabras Clave:** EDAR, ATAD, digestión aerobia termófila autosostenida, QFT, control cuantitativo, control robusto, pasteurización, higienización, estabilización, fango de depuración.

## 1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, tanto el aumento en la producción de fangos de EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) como la aparición de normativas más estrictas en cuanto a la calidad del fango tratado, plantean nuevas necesidades en el tratamiento de este residuo. La aparición de nuevos métodos de tratamiento, como la digestión aerobia termófila autosostenida (ATAD) [1], mejoran la calidad del fango tratado. La inyección de oxígeno (aire) provoca la metabolización de la materia orgánica mediante bacterias aerobias termófilas, alcanzando temperaturas de trabajo medias entre 45 °C y 75 °C. La temperatura de trabajo necesaria para la actividad de las bacterias termófilas, se mantiene gracias a la

propia reacción exotérmica durante la digestión del fango. Una adecuada operación del digestor ATAD, disminuye el número de patógenos en el fango (higienización) y la cantidad de materia orgánica (estabilización), utilizando la inyección de aire adecuada. El logro de estos objetivos en línea (*on-line*) y de forma autónoma, sugiere la incorporación del control automático. El primer reto será por tanto estudiar como incorporar los criterios de calidad (higienización y estabilización) de fango tratado en especificaciones de control, así como determinar cuales serán las variables medibles y variables manipulables en línea para conseguirlas.

El gobierno de los digestores ATAD es complejo y su dificultad reside en características como su modo de operación por lotes (tipo *batch*), la variabilidad del fango a tratar, las múltiples variables de actuación (caudales de fango entrante y saliente, tiempo de *batch* o caudal de aire inyectado, entre otras), las pocas variables medibles en línea (temperatura, índice ORP), la complejidad de los procesos biológicos y físico-químicos no lineales o con parámetros variantes, y su incorporación en modelos dinámicos [2]. Algunas estrategias de control propuestas hasta el momento se basan en leyes de control no lineales [3][4] que modifican el caudal de aire. En ellas se decide el corte total, o el incremento/reducción fijo del aire aplicado en el siguiente ciclo, en función de un algoritmo de detección de cambio de pendiente (codo) en la temperatura del digestor dentro de un *batch*.

En este trabajo se propone la utilización de estrategias lineales de control realimentado para asegurar un *performance* y estabilidad en la consecución de puntos de operación óptimos, que se establecen de forma no lineal y se aplican como entradas de referencia externas al lazo de realimentación. Se define como punto de operación el caudal de aire y la temperatura media en el digestor a lo largo de un *batch*. Las no linealidades

del sistema y la variabilidad de las condiciones de operación se sustituyen por incertidumbre y entradas externas, diseñándose controladores robustos mediante QFT (*Quantitative Feedback Theory*) [5]. Para la obtención de modelos y análisis del ATAD, así como para la evaluación y comparación objetiva del comportamiento de las estrategias de control se utiliza un *benchmark* de simulación específico para tratamiento ATAD de fangos [3][4].

La organización de este trabajo comienza en la *Sección 2* con el estudio y modelado un digestor ATAD. Posteriormente en la *Sección 3* se describe la estrategia de control desarrollada. En la *Sección 4* se muestran los resultados más relevantes y por último, en la *Sección 5* se resumen las principales conclusiones.

## 2 DIGESTOR ATAD

### 2.1 MODELOS DE SIMULACIÓN

En ingeniería medioambiental, los *benchmarks* de simulación son una práctica metodológica muy habitual para la evaluación y comparación objetiva del comportamiento de distintas estrategias de control. Para tratamientos activos de aguas residuales pueden citarse el BSM1 [6] y su revisión BSM1\_LT [7]. En el BSM2 [8][9] se incorpora el tratamiento de fangos a la tradicional línea de aguas. Para el tratamiento ATAD de fangos se empleará uno específico de este proceso, concretamente el AT\_BSM [3] ampliamente desarrollado en [4]. Este modelo no lineal validado de un ATAD se ha utilizado en este trabajo para:

- (i) estudiar el comportamiento del digestor,
- (ii) aproximar modelos lineales para diseñar controladores,
- (iii) implementar las estructuras de control y validar sus resultados,
- (iv) evaluar la calidad del fango tratado y los costes de operación.

### 2.2 MODO DE OPERACIÓN

En la mayoría de los casos, los ATAD operan en modo *batch*, siguiendo una secuencia llenado-reacción-vaciado. La higienización del fango es un objetivo primordial, luego se deben evitar cortocircuitos hidráulicos durante la digestión. De acuerdo con los requerimientos de la UE [10] para procesos de pasteurización funcionando en modo *batch*, se establece un ciclo secuencial de 24 horas, dividido en 0.5 horas de alimentación de efluente, 23 horas de reacción (fase de aireación) y 0.5 horas de vaciado – véase Fig. 1-. La alimentación discontinua del ATAD obliga a emplear un tanque de pre-almacenamiento

antes del digestor –véase Fig. 2- lo que favorece la homogenización en cierta medida de la concentración de materia orgánica de los lotes a tratar.

Considerando un caudal de aireación constante aplicado al proceso (sin cortes y sin variaciones), la temperatura del fango asciende de forma lineal durante la digestión. En las últimas horas del proceso se pueden presentar dos escenarios diferentes [2]:

- (i) Que el sustrato biodegradable no se digiera completamente, lo que se conoce como situación de oxígeno limitante. El *batch* se encuentra sub-aireado. Fig. 1 (a).
- (ii) Que el sustrato biodegradable se digiera completamente, lo que se conoce como situación de sustrato limitante, el *batch* se encuentra sobre-aireado. Fig. 1 (b).

En términos del modelado matemático, cuando el sustrato se digiere, la fracción rápidamente biodegradable ( $S_s$ ) y lentamente biodegradable ( $X_s$ ) se agotan. Con ello, la tendencia lineal ascendente de la temperatura del fango durante el *batch* sufre un cambio de pendiente. La Fig. 1 ilustra estos aspectos:

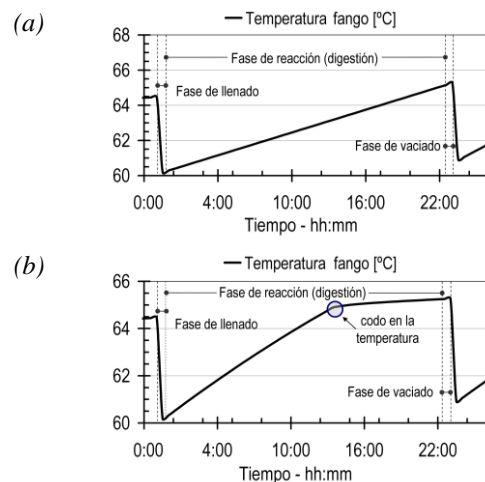


Figura 1: Escenarios de digestión en el ATAD (a) con oxígeno limitante. (b) con sustrato limitante

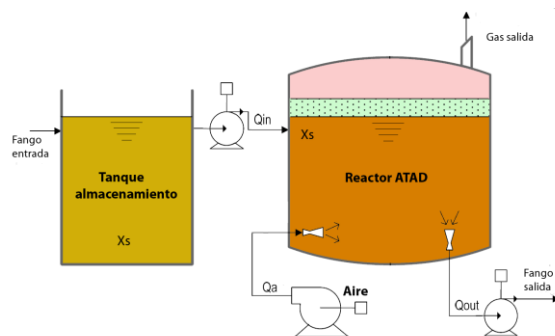


Figura 2: Diagrama del proceso ATAD

El sustrato lentamente biodegradable ( $X_s$ ), ha sido seleccionado como la variable más representativa del contenido de materia orgánica del fango a tratar.

En este trabajo se ha determinado un modo de operación por lotes de duración fija (secuencia descrita anteriormente) y con aporte/vaciado de caudales constantes de fango a tratar.

### 2.3 VARIABLES DE MEDIDA Y ACTUACIÓN

La temperatura del fango dentro del reactor es la única variable fiable y medible en línea, tomándose muestras  $T_i$  de la misma cada minuto. El caudal de aire inyectado al digestor  $Q_a$ , es la variable principal usada para regular la evolución de la reacción exotérmica, y por tanto la temperatura del fango. No obstante, cuando se completa la degradación de la materia orgánica, el caudal de aire inyectado tiene un efecto contraproducente, provocando un efecto de enfriamiento en el digestor.

Para evitar la complejidad del control de un sistema por lotes (*batches*), se ha determinado que la temperatura media en el *batch*,  $T_m = \sum_{i=1}^n T_i / n$ , es una

magnitud suficientemente representativa del estado de operación del digestor. Dicha  $T_m$  será la variable realimentada sobre la que se calcula la ley de control lineal de cambio de  $Q_a$ . Por tanto, el intervalo de muestreo/actuación se establece en  $T_s = 1$  día (igual a la duración del *batch*). Partiendo de la medida de  $T_i$  se calcula la señal de temperatura media  $T_m$ , mediante un filtro paso-bajo de tipo *Butterworth*, diseñado para reducir en al menos 40dB las frecuencias próximas y superiores a la frecuencia correspondiente a la duración del *batch*.

El criterio que tendrá prioridad para ser optimizado y maximizado es la estabilización. Por ello se establecerá como referencia la máxima temperatura media alcanzable en función de la carga orgánica. Por sí mismo, esto implicaría cumplir el criterio de higienización (tiempo determinado por encima de cierta temperatura) si la capacidad energética del efluente (contenido orgánico) lo permite.

### 2.4 MODELO DINÁMICO LINEAL

Utilizando el AT\_BSM, se ha realizado en primer lugar un estudio estacionario del ATAD, simulando incrementos escalonados de 1250 m<sup>3</sup>/día en el caudal de aireación  $Q_a$  cada 50 *batches*. Se obtienen las curvas (Fig. 3) que relacionan la cantidad fija de aire inyectada ( $Q_{ae}$ ) con la temperatura media del *batch* número 50 ( $T_m$ ), para distintas calidades de fango (distintos valores de materia orgánica  $X_s$ ) a tratar. Se deduce que todas las curvas para diferentes  $X_s$ ,

concurren en una misma trayectoria ascendente, hasta alcanzar un cambio de pendiente a diferente temperatura según el fango evaluado (cuanta mayor cantidad de  $X_s$ , mayor es la temperatura alcanzada).

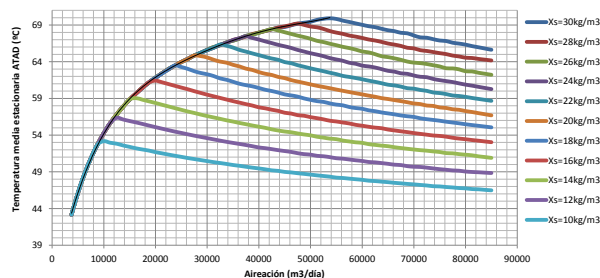


Figura 3: Estacionario de temperatura media del ATAD vs cantidad de aire

Este tramo ascendente puede aproximarse por:

$$T_{me} = 3.7039 \times 10^{-22} Q_{ae}^5 - 6.6489 \times 10^{-17} Q_{ae}^4 + 4.7122 \times 10^{-12} Q_{ae}^3 - 1.6998 \times 10^{-7} Q_{ae}^2 + 3.4527 \times 10^{-3} Q_{ae} + 32.573 \quad (1)$$

y será la zona deseable de operación estable, ya que los incrementos de caudal se traducen en incrementos ostensibles de temperatura al acelerar la degradación de la materia orgánica biodegradable. En cambio, más allá del punto de máximo, esta materia orgánica ya se ha consumido y cualquier aumento de caudal no hace sino enfriar el digestor, según el efecto contraproducente que se describe en el apartado anterior. Por tanto, el punto máximo de cada curva es el punto de operación óptimo (máxima estabilización e higienización). Sin embargo, el alcance de este punto es complejo, ya que el acercamiento dinámico deber realizarse por la izquierda (ganancia positiva) o zona de oxígeno limitante (a lo sumo, se permitirían pequeñas excursiones a la derecha); y además  $X_s$  no es medible *on-line*, luego la determinación de la curva del fango actual es imposible a priori.

La supervisión de la zona actual de operación dado un cierto fango se realiza a través de la temperatura instantánea  $T_i$  en cada *batch*. Se ha comprobado que si se producen codos en  $T_i$  -Fig. 1 (b)- el sistema  $Q_a$ - $T_m$  ha superado el punto de máximo de la curva estacionaria, encontrándose el sistema en la zona derecha de la curva correspondiente en la Fig. 3, y por tanto el sistema de control debe reducir tanto la temperatura media de referencia como el caudal de aire correspondiente para estabilizarlo de nuevo.

Por otro lado, analizando el transitorio de  $T_m$  ante los cambios escalón en  $Q_a$ , se ajustan modelos dinámicos de primer orden [11]:

$$\frac{T_m(s)}{Q_a(s)} = \frac{k}{(\tau s + 1)}, \quad k \in [0.2 \cdot 10^{-3}, 10^{-3}], \quad \tau = 6 \quad (2)$$

Estos modelos se caracterizan por una ganancia  $k$ , cuya incertidumbre está relacionada con los diversos estacionarios de la Fig. 3, y una constante de tiempo  $\tau$  expresada en días o *batches* que puede considerarse prácticamente invariante. Nótese el signo positivo de la ganancia, lo que se corresponde con una operación a la izquierda del punto máximo en cada curva de  $X_s$  constante. La variabilidad de la ganancia se obtiene mediante linearización de primer orden del comportamiento estático no lineal en (1).

### 3 ESTRATEGIA DE CONTROL

Se emplea la estructura de control según Fig. 4. Se propone la utilización de un controlador lineal  $C(s)$  diseñado para asegurar un *performance* y una estabilidad de la respuesta del sistema ( $T_m$ ) en puntos de operación ( $T_{ref}$  y  $Q_{ref}$ ) que se modifican de forma no lineal. En un estudio previo se determinan los puntos óptimos  $T_{ref}-Q_{ref}$  que se corresponden con los máximos de cada curva en la Fig. 3. Desde el punto de vista de control realimentado estos cambios son vistos por el sistema lineal como perturbaciones en su entrada y en su salida. Como no es posible medir en línea la variable  $X_s$ , el generador de puntos de operación va modificando éstos en busca del óptimo para un fango desconocido. Si a través de la supervisión de  $T_i$  se detectan codos en la temperatura de *batch* el generador reduce  $Q_{ref}$  -y calcula la  $T_{ref}$  asociada a través de (1)-. Por el contrario si no se detectan codos  $Q_{ref}$  debe aumentar.

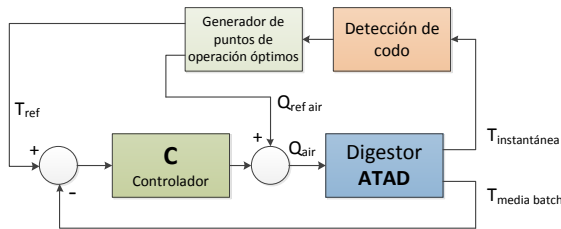


Figura 4: Estructura de control del ATAD

#### 3.1 DETECCIÓN DE CODOS

El análisis *on-line* de la trayectoria de la temperatura del fango durante el *batch*  $T_i$  proporciona información importante para la estrategia de control antes detallada. Se consideró un algoritmo basado en regresión lineal aplicado a una ventana móvil de datos por dos razones:

- (i) los datos del principio de la fase de reacción no son útiles para las detecciones de codo
- (ii) almacenar todo el historial de datos puede ser poco práctico

El método de detección del punto de codo es el siguiente:

1. Se consideran los datos registrados en una ventana de tamaño  $N$  (número impar) durante un cierto tiempo. Internamente, esta ventana se divide en dos registros de tamaño  $N/2$ : un registro almacena los  $N/2$  datos más nuevos ( $W_{new}$ ) y otra almacena los  $N/2$  datos viejos ( $W_{old}$ ).
2. Los cambios en la temperatura del fango se analizan mediante regresión lineal de  $W_{new}$  y  $W_{old}$ . Cuando se reciben nuevos datos en la ventana, el tiempo y la señal se graban y se calculan los valores pendientes de cada registro  $m_{new}$  y  $m_{old}$ .
3. Para cada nuevo dato de la ventana, se evalúa el cambio de tendencia de cada señal calculando la diferencia entre los valores pendientes de los registros como sigue:

$$\alpha [^\circ] = \frac{180}{\pi} \{ \text{tg}^{-1}[m_{new}] - \text{tg}^{-1}[m_{old}] \} \quad (3)$$

Dónde  $\alpha$  es el ángulo entre el registro  $W_{old}$  y  $W_{new}$ . Ocurre un punto de codo cuando  $\alpha$  es mayor que un cierto valor.

La señal del detector de codos se empleará en el generador de referencias como se indica anteriormente.

#### 3.2 CONTROLADOR ROBUSTO QFT

Se extrajo un modelo de primer orden con incertidumbre en la ganancia (2). De esta forma, el cambio no lineal del punto de operación se sustituye por incertidumbre, y desde el control robusto QFT se afronta como un problema de rechazo de perturbaciones [5][12]. Entonces, se establecen especificaciones frecuenciales de estabilidad robusta (4), que asegura unos mínimos márgenes de estabilidad ( $MF=45^\circ$  y  $MG=5\text{dB}$ ), y especificaciones de *performance* para el rechazo robusto de perturbaciones a la salida de la planta (5). La función de lazo abierto es  $L=CP$ , y en  $P$  se incluye tanto el modelo lineal con incertidumbre en (2) como el filtro *Butterworth* para obtener  $T_m$  a partir de  $T_i$ .

$$\left| \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq W_s, \quad W_s = 1.2, \quad \forall \omega \quad (4)$$

$$\left| \frac{1}{1+L(j\omega)} \right| \leq W_r, \quad W_r(\omega) = \left| \frac{5j\omega}{(5j\omega+1)} \right|, \quad \forall \omega \leq 0.1 \quad (5)$$

No se han elegido especificaciones de control muy exigentes, ya que el objetivo no es tanto acelerar la respuesta del sistema como mantenerlo bajo control y que tienda de forma estable al punto óptimo marcado por el generador de referencias, para todo el rango de operación considerado. El siguiente controlador lineal  $C$  cumple las expectativas mencionadas:

$$C(s) = \frac{1e3(6s+1)}{s(s+1)} \quad (6)$$

### 3.3 OTRAS CONSIDERACIONES

No es posible detectar *on-line* la calidad del fango que está siendo tratado, y por tanto la generación de referencias de temperatura y caudal se basa en leyes incrementales. Si se estima que no se ha llegado al máximo se utilizan incrementos positivos de caudal de aire, mientras que si ya se ha alcanzado éste, los incrementos serán negativos. Si mediante la vigilancia *on-line* de  $T_i$  se detecta codo antes de finalizar el batch, se deben disminuir las referencias, y al contrario si no se detecta codo en  $T_i$ . Por tanto, la ley no lineal se encuentra fuera del lazo de control realimentado (afectando a las referencias), lo que asegura que el lazo interno lineal sea estable, fiable y robusto, siempre que la referencia no opere mucho más allá del máximo de la curva correspondiente, sufra pequeños cambios o si se trata de cambios considerables éstos se realicen lentamente.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ZONA ESTABLE Y ZONA INESTABLE

En las Fig. 5 y 6 se analizan algunos resultados. Estos resultados dependerán del diseño del controlador lineal, del diseño del sistema generador de referencias, de la fiabilidad en la detección de codos, así como del digestor ATAD y del efluente que incorpora el *benchmark* de simulación AT\_BSM. Se representan la salida (temperatura media, filtrada a partir de una temperatura instantánea), su error respecto a la referencia planteada, y la acción de control (caudal de aire). En las gráficas de temperatura, se incluye también una ampliación de la temperatura instantánea de un *batch* de un día, donde se aprecia la presencia o no de codos.

En la Fig. 5 el sistema opera en la zona estable o esperada. Se aplica un incremento de la temperatura de referencia (y de su caudal correspondiente) pues el contenido orgánico del fango a tratar lo permite, y tomando como índice el tiempo de subida de la respuesta, se observa como el controlador regula el caudal necesario para que en aproximadamente 6 días se alcance el nuevo régimen. En este modo estable de operación, el sistema real siempre estará cerca de su óptimo, por lo que los transitorios de 6 días alrededor de éste no son significativos de cara al cumplimiento de los criterios de estabilización o higienización. La referencia de temperatura sufrirá variaciones pequeñas de ciclo a ciclo según el contenido real de materia orgánica que tenga el fango a tratar.

En la Fig. 6 se ilustra el peligro de plantear una referencia que haga operar al sistema en la zona inestable –temperaturas más allá del máximo alcanzable para el contenido orgánico según Fig. 3–. Por tanto, el algoritmo adaptativo que debe ir cambiando la referencia adecuadamente, tratando de encontrar el punto óptimo sin llegar a la zona inestable, es un elemento clave. Este será el objetivo de futuros trabajos. Actualmente el mecanismo opera suficientemente lejos y a la izquierda del máximo por motivos de seguridad. La principal ventaja de este sistema es que controla y regula de forma automática el ATAD sin necesidad de ajustes manuales.

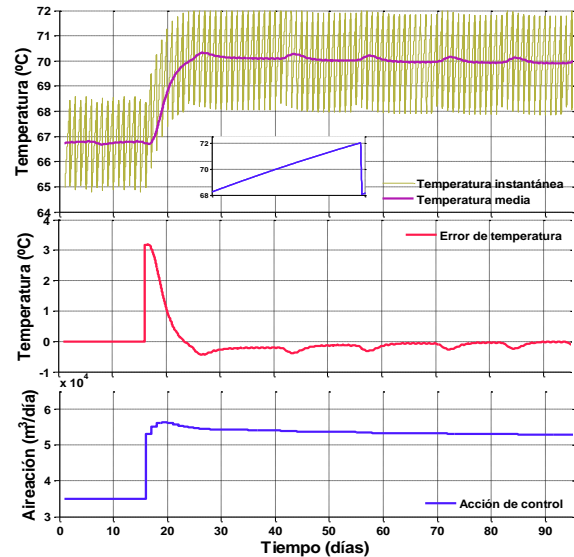


Figura 5: Comportamiento ATAD zona estable.

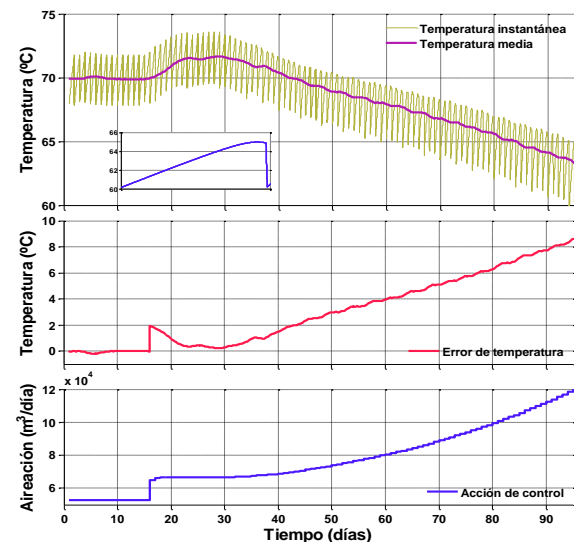


Figura 6: Comportamiento ATAD zona inestable

### 4.2 CAMBIOS EN LA CALIDAD DEL FANGO A TRATAR

Los cambios en  $T_{ref} - Q_{ref}$  antes analizados vendrán sugeridos por el sistema de detección de codos. Y en la mayoría de los casos será consecuencia de una

variación del tipo de fango que entra al digestor. En la Fig. 7 se analiza directamente este fenómeno simulando escalones en la variable  $X_s$ . Puede observarse como la temperatura media calculada  $T_m$ , tiende a aproximarse a la temperatura de referencia óptima  $T_{ref}$  establecida para cada calidad de fango entrante. A ello contribuyen tanto el nuevo  $Q_{ref}$  directamente inyectado como el caudal corrector calculado por la ley lineal.

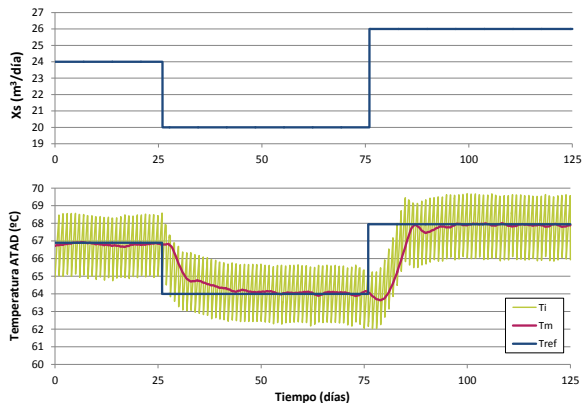


Figura 7: Evolución de temperatura en ATAD frente a cambios en la calidad de fango a tratar.

El retardo adicional producido por el tanque de almacenamiento (Fig. 2) no se ha tenido en cuenta en las simulaciones anteriores ya que el objetivo principal es la evaluación del controlador en el digestor. En la práctica, los cambios escalón de  $X_s$  afectarían al tanque de almacenamiento, siendo transmitidos de forma filtrada y retardada al digestor.

## 5 CONCLUSIONES

La estrategia de control presentada cumple los criterios de higienización y maximiza la estabilización de fangos de EDAR tratados en digestores ATAD según la normativa europea. El empleo del control automático, además, reduce el gasto energético para conseguirlo. Esta estrategia se basa en un control robusto lineal realimentado, junto con un generador de referencias no lineal que proporciona puntos de operación para la consecución de temperaturas medias en el ATAD óptimas desde el punto de vista de máxima degradación del contenido de materia orgánica del fango. Además, esta estructura de control presenta una gestión totalmente automática que se adapta a distintas calidades de fango.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado en parte por el proyecto de investigación IMPULSA 2010/01 dentro del Plan Riojano de I+D+i 2008-2011.

## Referencias

- [1] T.M. LaPara, J.E. Alleman, "Thermophilic aerobic biological wastewater treatment", *Water Research*, **33**(4), (1999) pp. 895-908.
- [2] J. Gomez, M. de Gracia, E. Ayesa, J.L. Garcia-Heras, "Mathematical modelling of autothermal thermophilic aerobic digesters", *Water Res.* **41**(5), (2007) pp. 959-68.
- [3] J. A. Zambrano, M. Gil-Martinez, M. Garcia-Sanz and I. Irizar, "Benchmarking of control strategies for ATAD technology: a first approach to the automatic control of sludge treatment systems", *Water Science & Technology*, **60**(2), (2009) pp. 409-417.
- [4] J. A. Zambrano. "Autothermal Thermophilic Aerobic Digestion: Design of Controllers and Benchmarking Validation". PhD Dissertation. University of Navarre, Spain (2011)
- [5] C. H. Houppis, S. J. Rasmussen, and M. Garcia-Sanz, "Quantitative Feedback Theory Fundamentals and Applications", CRC Press Book. Taylor and Francis, (2006).
- [6] J. B. Copp, The COST Simulation Benchmark - Description and Simulator Manual. Luxembourg: Official Publications of the European Communities, 2002.
- [7] C. Rosen, U. Jeppsson, and V. P.A., "Toward a common benchmark for long-term process control and monitoring performance evaluation", *Water Science and Technology*, **50**, (2004) pp. 41-49.
- [8] Vrecko, D., Gernaey, K.V., Rosen, C., Jeppsson, U., "Benchmark Simulation Model No 2 in Matlab-Simulink: Towards plant-wide WWTP control strategy evaluation." *Water Science and Technology*, **54**, (2006) pp. 65-72.
- [9] Jeppsson, U., Pons, M.N., Nopens, I., Alex, J., Copp, J.B., Gernaey, K.V., Rosen, C., Steyer, J.P., Vanrolleghem, P., "Benchmark simulation model no 2: General protocol and exploratory case studies." *Water Science and Technology*, **56**, (2007) pp. 67-78.
- [10] European Commission, 2000. "Working document on sludge" - 3rd draft. ENV.E.3/LM.
- [11] Dorf R.C., Bishop R.H., "Modern Control Systems", Pearson Prentice Hall, (2007).
- [12] Yaniv, O., "Synthesis of Feedback Systems", Faculty of Engineering, Tel-Aviv University, (1995).