

Estabilización y pasteurización óptimas en digestores ATAD mediante estrategias de control robusto QFT

S. Nájera⁽¹⁾, M. Gil-Martínez⁽²⁾, J.A. Zambrano⁽³⁾, I. Irizar⁽⁴⁾

⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ *Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de La Rioja, 26004 Logroño, España.
Tel: 941299479, e-mail: silvano.najerac@unirioja.es*

⁽⁴⁾ *CEIT y TECNUM, Universidad de Navarra, 20018 San Sebastián, España.*

Resumen

Se presenta una nueva estrategia de control para digestores ATAD cuyo objetivo es maximizar el cumplimiento de los criterios de estabilización e higienización con el mínimo gasto de aireación. Un controlador lineal diseñado mediante técnicas robustas QFT asegura la estabilidad y el *performance* de la evolución de la temperatura media del ATAD, trabajando en un punto de operación específico. El punto óptimo lo determina de forma no lineal un generador de referencias de temperatura media-caudal. Estas se adaptan al tipo de fango, mediante la supervisión de ocurrencia o no de codos en la temperatura instantánea dentro de un *batch*.

1. Introducción

El aumento en la producción de fangos de EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) y la aparición de normativas más estrictas en cuanto a la calidad del fango tratado, plantean nuevas necesidades en el tratamiento de este residuo. Nuevas tecnologías, como la digestión aerobia termófila autosostenida (ATAD) [1], mejoran la calidad del fango tratado mediante un suministro de aire. Una adecuada operación del ATAD, además de minimizar el caudal de aire empleado, disminuye el número de patógenos en el fango (higienización) y la cantidad de materia orgánica (estabilización). Este será el objetivo de la incorporación de estrategias de control automático, y por tanto, el primer reto será estudiar como incorporar los criterios de calidad de fango tratado en especificaciones de control, a través de variables medibles y variables manipulables en línea.

La dificultad en el gobierno de los digestores ATAD reside en características como su modo de operación 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] sobre el caudal de aire. En ellos se decide el corte total, o el aumento/reducción del aire aplicado en el siguiente ciclo, en función de un sistema de detección de codo en la temperatura del digester 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 como referencias fuera del lazo de realimentación. Se define como punto de operación el caudal de aire (variable de actuación) y la temperatura media en el digester a lo largo de un *batch* (variable medible). Las no linealidades del sistema y la variabilidad de condiciones de operación se sustituyen por incertidumbre, 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 [3][4].

La organización de este trabajo comienza en el Sección 2 con la descripción de los estudios realizados y conclusiones referentes al funcionamiento de un digester ATAD para su posterior control automático. A continuación, en la Sección 3 se describe la estrategia de control y los resultados logrados. Por último, en la Sección 4 se resumen las principales conclusiones.

2. Digestor ATAD

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] son incorporadas ambas, la línea de aguas y la de tratamiento de fangos. Para el tratamiento ATAD de fangos se empleará uno específico, 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) obtener 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.

En cuanto al estudio del comportamiento de un digestor ATAD se ha determinado como modo de operación para el AT_BSM: lotes de duración fija de 1 día, con aporte/vaciado de caudales constantes de fango a tratar. Antes de su entrada al digestor, el fango que llega de distintas fuentes es almacenado en un tanque, lo que homogeniza en cierta medida la concentración de materia orgánica de los lotes a tratar. Se ha considerado como variable más representativa para valorar el contenido de materia orgánica, la concentración de sustrato lentamente biodegradable, en adelante X_s . La temperatura en el digestor es la única variable medible y fiable; se obtienen muestras T_i de temperatura cada minuto. El aire inyectado en el digestor (Q_a) es la variable que tiene más influencia para regular la evolución de la reacción exotérmica y por tanto, la temperatura. No obstante, cuando se completa la degradación de la materia orgánica, la inyección de caudal tiene un efecto contraproducente ya que acelera el enfriamiento del 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. El criterio que tendrá prioridad para ser optimizado y maximizado es la estabilización, fijándose éste en la máxima temperatura alcanzable, que es función de la carga orgánica. Por si mismo, esto implicaría cumplir el criterio de higienización si la capacidad combustible del efluente lo permite.

El estudio estacionario del sistema se realiza simulando periodos de 50 *batches* entre cada cambio en la actuación. Se obtienen curvas (Fig. 1) que relacionan una cantidad fija de aire inyectada (Q_{ae}) con la temperatura media estacionaria (T_{me}) alcanzada en el último *batch*, para distintas calidades X_s de fango a la entrada. Se deduce que todas las curvas para diferentes X_s ascienden por el mismo camino, que puede aproximarse por la ecuación:

$$T_m = 3.703910^{-22} \cdot Q_a^5 - 6.648910^{-17} \cdot Q_a^4 + 4.712210^{-12} \cdot Q_a^3 - 1.699810^{-7} \cdot Q_a^2 + 3.452710^{-3} \cdot Q_a + 32.573 \quad (1)$$

Este tramo ascendente de cada curva será la zona de operación, ya que los incrementos de caudal se traducen en incrementos ostensibles de temperatura al acelerar la degradación de la materia orgánica biodegradable. Por el contrario, más allá del punto de máximo, esta materia orgánica ya se ha consumido y cualquier aumento de caudal no hace sino enfriar el digestor. Por tanto, el punto de máximo es el de operación óptima: maximiza la estabilización y favorece la higienización. Sin embargo, la consecución de este punto es compleja, ya que el acercamiento dinámico deber realizarse por la izquierda (o a lo sumo, se permitirían pequeñas excursiones a la derecha); y además X_s no es medible *on-line*. 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 , el sistema Q_a-T_m ha superado el punto de máximo, y se debe reducir la temperatura media de referencia y el caudal correspondiente.

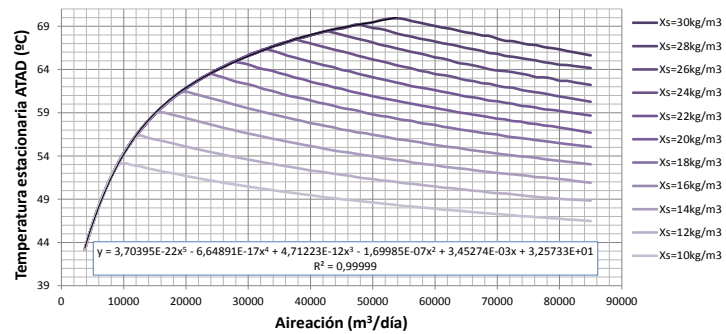


Fig. 1. Estacionario de Temperatura media del ATAD vs cantidad de aire

Por otro lado, mediante experimentos de cambio escalón en Q_a , se ajustan modelos dinámicos de primer orden a las respuestas obtenidas en T_m expresados en el dominio de Laplace como función de transferencia [10]:

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

Estos modelos se caracterizan por una ganancia k , relacionada con los estacionarios de la Fig.1, y una constante de tiempo τ expresada en días. Nótese el signo positivo de la ganancia, lo que se corresponde con una operación a la izquierda del punto de 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 en Fig. 2. Se propone la utilización de un controlador lineal C diseñado para asegurar un *performance* y una estabilidad de la respuesta del sistema (T_m) en puntos de operación óptimos, que se deben calcular previamente (*off-line*). Para un determinado ATAD resultaron los de la Fig.1. Estos puntos se incorporan en la estructura de control que opera *on-line*, como referencias para T_m –lo que lleva aparejado el correspondiente incremento del punto de operación del caudal Q_a tal que se cumpla (2)–. 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, o decrecimentales si ya se ha alcanzado éste. 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 está fuera del lazo de control realimentado (afecta a las referencias), lo que asegura que el lazo interno lineal sea estable, fiable y robusto, si la referencia no opera mucho más allá del máximo.

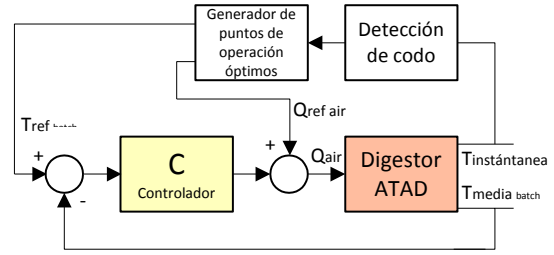


Fig. 2. Estructura de control del ATAD

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*.

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 a la salida [5]. Entonces, se establecen especificaciones frecuenciales de estabilidad robusta (3), 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 (4). 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 .

$$\left| \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq W_s, \quad W_s = 1.2, \quad \forall \omega \quad (3)$$

$$\left| \frac{1}{1+L(j\omega)} \right| \leq W_r, \quad W_r(\omega) = \left| \frac{5 \cdot j\omega}{(5 \cdot j\omega + 1)} \right|, \quad \forall \omega \leq 0.1 \quad (4)$$

No se han elegido especificaciones de control muy exigentes. 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:

$$C(s) = \frac{1e3 \cdot (6s + 1)}{s \cdot (s + 1)} \quad (5)$$

En las Fig. 3 y 4 se analizan algunos resultados. Estos 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. 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 Fig. 3 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. Lógicamente en una operación real del ATAD, transcurridos los días precisos para operar cerca de los óptimos, estos saltos de referencia serán menores y variables en cada *batch*, tratándose de adaptar a la variabilidad del contenido orgánico que va entrando, pero que sólo es detectable *on-line* a posteriori. Durante este régimen de operación, el sistema operaría 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. En Fig. 4 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.1-. Por tanto, un elemento clave es el algoritmo adaptativo que debe ir cambiando la referencia adecuadamente, y a la vez ir buscando el punto de óptimo sin desviaciones considerables a la derecha. 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.

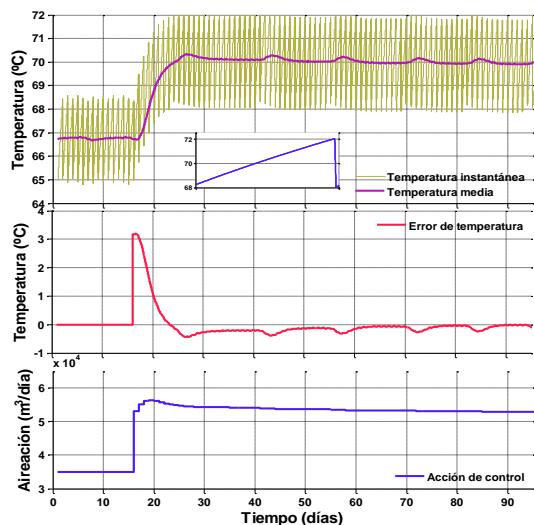


Fig. 3. Comportamiento ATAD zona estable.

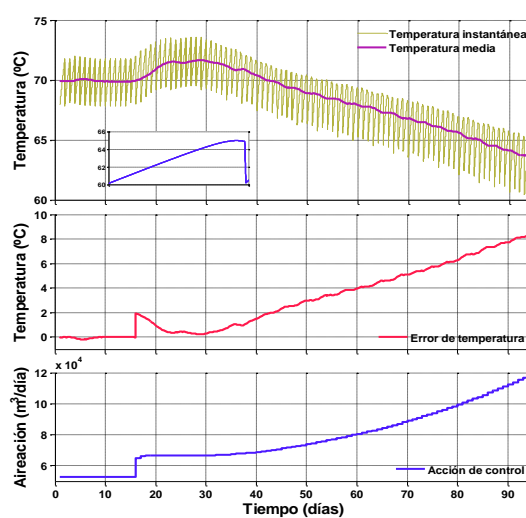


Fig. 4. Comportamiento ATAD zona inestable.

4. Conclusiones

La estrategia de control presentada optimiza el gasto energético para cumplir los criterios de higienización y máxima estabilización de fango de EDAR tratados en digestores ATAD. Se basa en un control robusto lineal realimentado, más un generador de referencias no lineal 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, la estructura representa un control totalmente automático que se adapta a distintas calidades de fango *on-line*.

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(14).
- [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] Dorf R.C., Bishop R.H., "Modern Control Systems", Pearson Prentice Hall, (2007).