

APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS AVANZADAS DE SOPORTE A LA TOMA DE DECISIONES EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LODOS

Cugueró Escofet, Miquel Àngel – Consorci Besòs – Tordera

Aguiló Martos, Pere – Consorci Besòs – Tordera

Sáenz de Cabezón Soriano, Berta – Consorci Besòs – Tordera

Sánchez Marrè, Miquel – Universitat Politècnica de Catalunya

SUMARIO

El *Consorci Besòs – Tordera (CBT)*, en su labor constante de investigación, mejora y optimización del funcionamiento de sus Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDARs), ha desarrollado un sistema de diagnosis avanzada del proceso de digestión anaerobia en tiempo real. Se trata de un sistema basado en la monitorización *on-line* de los parámetros clave de la digestión anaerobia, procesado y análisis avanzado de los datos y diagnosis del estado del proceso anaerobio. Dos parámetros clave monitorizados y con mayor peso en el balance y diagnóstico del proceso son el valor de ácidos grasos y la alcalinidad. El sistema considerado en este trabajo detecta desviaciones en el proceso, identifica las posibles causas de las desviaciones y propone medidas de actuación preventivas/correctivas. El sistema consigue incrementar la robustez y fiabilidad del proceso de digestión anaerobia. En este trabajo se presenta su aplicación en un sistema de saneamiento real en el municipio de Granollers (Barcelona).

PALABRAS CLAVE

Digestión anaerobia, codigestión, optimización, biogás, EDAR.

INTRODUCCIÓN

La digestión anaerobia es un proceso en el que intervienen microorganismos para descomponer material biodegradable en ausencia de oxígeno. Dotar a una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de una instalación de digestión de lodos tiene como objetivo fundamental reducir la cantidad de residuo generado por la planta, así como estabilizar ese residuo. El producto de la digestión, al margen de un lodo estabilizado, es un gas combustible, llamado biogás. El biogás está compuesto de diversos gases, en función del material que se esté digiriendo, entre los cuales cuentan el dióxido de carbono y el metano como los más abundantes. El biogás ya existe en la naturaleza, al existir procesos de digestión anaerobia por ejemplo en el lodo del fondo de los pantanos, como en el delta del Paraná en Argentina, donde se extrae este elemento como fuente energética (Aguiló, 2016). Este producto de la digestión anaerobia puede utilizarse para producir energía eléctrica mediante e.g. turbinas o comprimirse para uso en vehículos (Reina, 2007). En Gran Bretaña, por ejemplo, se estima que potencialmente el 17 % del consumo de combustible en vehículos podría ser proporcionado por este elemento (Baldwin, 2008).

Por otro lado, el volumen de los datos monitorizados en los sistemas telecontrolados crece significativamente año tras año. Cambios disruptivos recientes en la capacidad de procesamiento de la información, almacenamiento e interconectividad de las tecnologías computacionales crea cantidades sin precedentes de datos digitalizados. En esta nueva era, los datos son importantes porque garantizan la toma de decisiones adecuada, cuando se basan en datos relevantes e información relacionada extraída de datos en bruto (Dean, 2014). La



minería de datos (*Data Mining*) (Han & Kamber, 2000; Witten et al., 2016) es el proceso de identificación de patrones y obtención de nuevo conocimiento útil, en conjuntos de datos –implicando métodos relacionados con la inteligencia artificial, el *Machine Learning*, la estadística y las bases de datos–, siendo su objetivo la extracción de información y conocimiento a partir de los datos para transformarla en una estructura operativa –patrones, modelos predictivos, modelos discriminantes, etc.– para su uso posterior (Chakrabarti et al., 2006). La herramienta presentada en este trabajo utiliza heurísticas basadas en esta área de conocimiento. Además, la supervisión, control y optimización de procesos puede ser una tarea compleja y difícil, dada la variabilidad y potencial complejidad inherente a los mismos. En un proceso puede haber muchos elementos de diferente tipo que interactúan entre sí -e.g. mecánicos, electrónicos, humanos, biológicos, químicos-, con dinámicas no siempre conocidas que hacen que la tarea de control / supervisión pueda ser muy compleja. Especialmente, en el caso de las EDARs, el riesgo derivado de un mal funcionamiento es aún más severo, ya que sus consecuencias pueden representar impactos medioambientales importantes. Para evitarlo, la calidad del agua tratada en la salida de la planta debe cumplir con diferentes normativas ambientales aplicables, marcadas por la Directiva Europea y las correspondientes transposiciones al marco legal estatal. Además, las EDARs están en funcionamiento las 24 horas del día, los 365 días del año, lo que deriva en costes energéticos de explotación elevados por parte de las empresas explotadoras, que se pueden minimizar mediante la uso de técnicas de supervisión y control adecuadas, a la vez que garantizan una gestión más fiable del proceso, mejorando el diagnóstico de los posibles problemas y las posibles soluciones sugeridas. En el campo de los sistemas de supervisión / control de procesos, desde hace tiempo se aplican técnicas de Inteligencia Artificial (IA) para mejorar la fiabilidad de la supervisión de estos procesos y superar ciertas carencias de los sistemas de control clásicos (Stock, 1989). El rango de técnicas utilizadas va desde sistemas de control difuso (Czogaa & Rawlik, 1989) y control mediante redes neuronales artificiales (Capodaglio et al., 1991) o algoritmos genéticos (Karr, 1991), hasta Sistemas Inteligentes de Soporte a la Toma de Decisiones (IDSSs), que incorporan diversas técnicas de razonamiento y control inteligente (Sánchez et al., 1996). Los métodos basados en IA pueden aportar mejoras importantes en la supervisión / control de estos procesos, como la gestión de información cualitativa, la modelización del conocimiento experto, la modelización de la incertidumbre y las capacidades de razonamiento y de aprendizaje. Trabajos pioneros en esta área se pueden encontrar en (Serra, 1993), que propone un sistema basado en el conocimiento para el control y la supervisión de una EDAR, así como en (Sánchez-Marrè, 1996), que propone una arquitectura inteligente distribuida e integrada para la supervisión de EDARs, usando razonamiento basado en reglas, razonamiento basado en casos y diferentes algoritmos de control.

A modo de introducción, el *Consorci Besòs – Tordera* (CBT) es una institución local del agua fundada en 1988 e integrada por 56 entes, de los cuales 52 son municipios del *Barcelonès*, *Osona*, *Vallès Occidental* y *Vallès Oriental*, con una población de alrededor de 2400000 habitantes. El resto de entes que la integran son la *Diputació de Barcelona*, el *Área Metropolitana de Barcelona*, el *Consejo Comarcal del Vallès Oriental* y el *Consorcio para la Gestión de los Residuos del Vallès Oriental*. Las líneas de actuación del CBT son el saneamiento en baja (alcantarillados municipales), el saneamiento en alta (control de vertidos, colectores, bombeos y EDARs), la mejora del medio fluvial, la promoción y educación ambiental y el apoyo a los entes consorciados. De estos 52 municipios, 39 han delegado al CBT sus funciones como administración actuante en materia de saneamiento, con una población equivalente de 430000 habitantes y más de 4000 establecimientos industriales implantados. En cuanto a las actividades del CBT, dentro del saneamiento en baja (1250 km de tubería) se incluyen los servicios de conservación y limpieza de alcantarillados municipales, así como obras de ampliación y mejora. Por otra parte, para llevar a cabo el saneamiento en alta, dispone de 18 EDARs, casi 300 km de colectores y 45 estaciones de bombeo (EBARs). Además, el CBT también tiene actividad en proyectos de mejora del medio fluvial –cinco ríos y una riera en su ámbito: *Mogent*, *Congost*, *Tenes*, *Ripoll*, *Besòs* y *riera de Caldes*–, así como la promoción y la educación ambiental y el apoyo a los entes consorciados en estas materias. Su ámbito de actuación geográfico se detalla en la Figura 1.

Este trabajo toma como caso de estudio una EDAR real gestionada por el CBT, concretamente el sistema



pondiente. Así, la herramienta permite conocer el estado del proceso en tiempo real, detectar desviaciones en su comportamiento, identificar posibles causas para estas desviaciones y proponer medidas de actuación preventivas/correctivas, dependiendo de cada escenario concreto. Así mismo, la herramienta ajusta el tipo de monitorización al estado del proceso en cada muestreo.

Los parámetros del proceso monitorizados en tiempo real incluyen e.g. caudal de fango (Q) en m^3 por hora de fango enviado al digestor anaerobio, concentración de sólidos totales (ST) en g por litro del fango a digestión, ácidos grasos volátiles (AGV) en mg de $C_2H_4O_2$ por litro, alcalinidad (ALK) en mg de C_aCO_3 por litro, ratios de control derivados, temperatura (T) en $^{\circ}C$, y caudal de biogás ($Q_{biogás}$) en Nwm^3 por hora. El esquema del proceso de digestión que integra estos parámetros se detalla en la Figura 3. La comunicación de las lecturas del sistema con la herramienta se realiza mediante un Controlador Lógico Programable (PLC) con protocolo *OLE for Process Control* (OPC), estándar en el campo del control y supervisión de procesos industriales. A partir de estos datos monitorizados, la herramienta calcula otros parámetros e.g. el tiempo de residencia hidráulica (TRH) en días,

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

dónde V se corresponde al volumen del digestor en m^3 ; la carga de sólidos totales (CST),

$$CST = Q \cdot ST, \quad (2)$$

así como otros parámetros de interés, como la relación de ácidos grasos volátiles por alcalinidad (AGV/ALK), y otras relaciones como las existentes entre ALK y CST o ALK y $Q_{biogás}$. Todos estos parámetros se procesan mediante técnicas de minería de datos (Figura 4) para producir los resultados que se detallan en esta sección.



Figura 2. EDAR Granollers

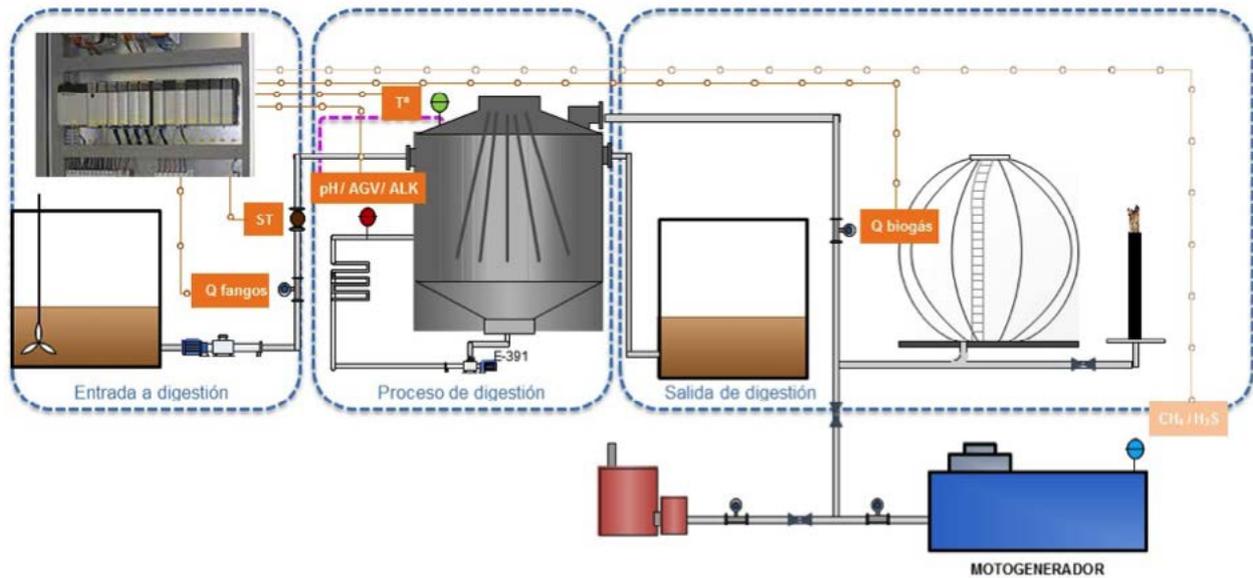


Figura 3. Esquema proceso digestión con parámetros monitorizados por el sistema

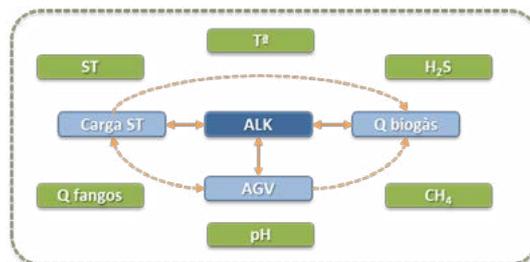


Figura 4. Relación de variables procesadas por la herramienta

El proceso de tratamiento de los datos monitorizados incluye una primera etapa de filtrado de las medidas –e.g. eliminación de datos espurios–, así como un procesado estadístico de estos datos incluyendo cálculos de índices de interés como medias horarias, diarias y semanales. Estos datos, juntamente con los valores en bruto medidos en cada instante, se analizan con la finalidad de validar el rango de operación de la medida del sensor, alertando al usuario en caso de dato invalidado. La herramienta también permite ajustar la frecuencia de muestreo de algunos parámetros e.g. AGV, ALK al estado del proceso, así como la posibilidad de incluir datos *off-line*, procedentes de analíticas de laboratorio, para mantener el sistema operativo en caso de avería o mantenimiento del analizador en continuo. La herramienta también realiza un diagnóstico del equipo de medida y genera alertas en caso de incidencias en su funcionamiento. Como salida, la herramienta presenta una tabla resumen y un perfil dinámico configurable de las variables principales del proceso, proporcionando información diagnóstica del estado del proceso de digestión –i.e. normal, anormal o desestabilizado–, alertando de posibles desviaciones de su estado de operación normal, identificando las posibles causas de estas desviaciones en caso de ocurrir y proponiendo medidas preventivas y correctivas a las mismas. Así mismo, la herramienta también propone tasas de alimentación del sustrato de codigestión, según caracterización obtenida en una fase previa. La caracterización de los posibles estados del proceso de digestión se realizó a través del análisis de datos provenientes de distintos digestores anaerobios en distintos momentos de funcionamiento. Este proceso de minería de datos se dividió en dos fases, después del pre-proceso de los mismos. La primera fase consistió en la obtención e identificación de distintos perfiles de funcionamiento. Con la ayuda de expertos en el proceso

fueron analizados, interpretados y validados, correspondiéndose a los estados de normalidad, anormalidad y desestabilización del digester. En la segunda fase, el objetivo era poder obtener las características principales que permitieran la identificación del estado de un nuevo digester en funcionamiento. Para cada grupo de digestores de un mismo estado se indujo un modelo discriminante (árboles de decisión (Quinlan, 1986)), que permitiera correlacionar el estado de funcionamiento de un digester con los valores (discretizados) de los parámetros del digester (i.e. AGV, ALK, etc.). A partir de los árboles de decisión, se extrajeron las correspondientes reglas de inferencia usadas para formar los módulos de diagnóstico, monitorización y soporte a la decisión del sistema supervisor implementado. En la tabla de diagnóstico (Figura 5) se muestra como la herramienta determina si el digester opera en condiciones de NORMALIDAD (Nivel 0), ANORMALIDAD (Nivel 1) o DESESTABILIZADO (Nivel 2), en función del número de advertencias o alarmas en los parámetros críticos y no críticos del proceso de digestión. En la Figura 5 también se muestra el listado de las principales variables del proceso de digestión e informa de la tendencia, advierte del estado (normal/anormal/alarma) y grafica la evolución semanal de cada una de ellas. Los parámetros críticos que pueden desestabilizar el digester si entran en alarma son las relaciones ALK/AGV, ALK/ST y ALK/Q_{biogas}. El resto de parámetros i.e. ST, T, AGV, ALK y Q_{biogas} no son críticos, i.e. no llevan al sistema al estado de alarma por si solos. Para alertar de las posibles desviaciones del estado de cada variable se definen tres umbrales de operación, i.e. normalidad (A₁, B₃), anormalidad (A₂, B₂) y alarma (A₃, B₁), y se considera la tendencia de las mismas, como se muestra en la Figura 6. Por ejemplo, si la relación AGV/ALK tiende a aumentar y supera el límite A₂, la herramienta crea una advertencia informando que el digester tiende a acidificarse y, si supera el límite A₃, crea una alarma indicando que el digester se encuentra acidificado. En la Tabla 1 se describen las variables principales del proceso, los estados de operación y las reglas de diagnóstico asociadas a cada estado, siendo γ_y el valor umbral de la tendencia $\Delta y / \Delta t$ para el parámetro del proceso en un incremento de tiempo Δt .

DIGESTOR 1	NIVELL 0	NIVELL 1	NIVELL 2
VARIABLE	TENDÈNCIA	ESTADO	GRÀFIC
Temps de residència hidràulic (TRH)	↓	✓	
Càrrega total (ST)	↑	✓	
Temperatura (T°)	↔	✓	
Àcids grassos volàtils (AGV)	↔	✓	
Alcalinitat (ALK)	↔	⚠	
Cabal de biogàs (Qbio)	↑	✓	
Relació AGV/ALK	↔	✓	
Estat dels equips de mesura	↔	✓	

Figura 5: Tabla de diagnóstico del estado del digester

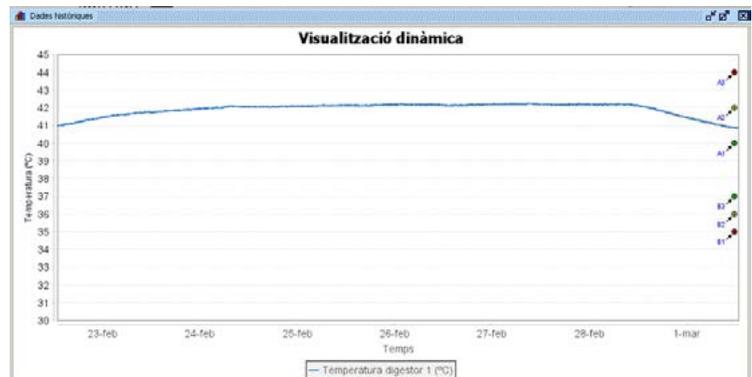


Figura 6: Gráfico de evaluación de la temperatura en el proceso de digestión

Tabla 1. Variables proceso digestión, estados del proceso y reglas de diagnosis

Variable	Normal	Advertencia	Alarma
Tiempo de residencia hidráulico (TRH) [d]	$TRH \geq B_{3_{TRH}}$	$TRH \leq B_{2_{TRH}} \parallel$ $(TRH \leq B_{3_{TRH}} \ \&\& \ \Delta TRH / \Delta t < \gamma_{TRH})$	$TRH \leq B_{1_{TRH}}$
Carga de sólidos totales (ST) [kg/d]	$ST \leq A_{1_{ST}}$	$ST \geq A_{2_{ST}} \parallel$ $(ST \geq A_{1_{ST}} \ \&\& \ \Delta ST / \Delta t > \gamma_{ST})$	$ST \geq A_{3_{ST}}$
Temperatura (T) [°C]	$B_{3_T} \leq T \leq A_{1_T}$	$T \geq A_{2_T} \parallel T \leq B_{2_T} \parallel$ $(T \geq A_{1_T} \ \&\& \ \Delta T / \Delta t > \gamma_T)$	$T \geq A_{3_T} \parallel T \leq B_{1_T}$
Ácidos grasos volátiles (AGV) [mg C ₂ H ₄ O ₂ /L]	$AGV \leq A_{1_{AGV}}$	$AGV \geq A_{2_{AGV}} \parallel$ $(AGV \geq A_{1_{AGV}} \ \&\& \ \Delta AGV / \Delta t > \gamma_{AGV})$	$AGV \geq A_{3_{AGV}}$
Alcalinidad (ALK) [mg CaCO ₃ /L]	$ALK \geq B_{3_{ALK}}$	$ALK \leq B_{2_{ALK}} \parallel$ $(ALK \leq B_{3_{ALK}} \ \&\& \ \Delta ALK / \Delta t < \gamma_{ALK})$	$ALK \leq B_{1_{ALK}}$
Caudal de biogás (Q _{biogas}) [Nm ³ /h]	$Q_{biogas} \geq B_{3_{bio}}$	$Q_{biogas} \leq B_{2_{bio}} \parallel$ $(Q_{biogas} \leq B_{3_{bio}} \ \&\& \ \Delta Q_{biogas} / \Delta t < \gamma_{Q_{bio}})$	$Q_{biogas} \leq B_{1_{bio}}$
Relación AGV/ALK	$AGV / ALK \leq A_{1_{AA}}$	$AGV / ALK \geq A_{2_{AA}} \parallel$ $(AGV / ALK \geq A_{1_{AA}} \ \&\& \ \Delta (AGV / ALK) / \Delta t > \gamma_{AGV / ALK})$	$AGV / ALK \geq A_{3_{AA}}$
Relación ALK/Q _{biogas}	$ALK / Q_{biogas} \leq A_{1_{AQ}}$	$ALK / Q_{biogas} \geq A_{2_{AQ}} \parallel$ $(ALK / Q_{biogas} \geq A_{1_{AQ}} \ \&\& \ \Delta (ALK / Q_{biogas}) / \Delta t > \gamma_{ALK / Q_{biogas}})$	$ALK / Q_{biogas} \geq A_{3_{AQ}}$
Relación ALK/ST	$ALK / ST \leq A_{1_{AS}}$	$ALK / ST \geq A_{2_{AS}} \parallel$ $(ALK / ST \geq A_{1_{AS}} \ \&\& \ \Delta (ALK / ST) / \Delta t > \gamma_{ALK / ST})$	$ALK / ST \geq A_{3_{AS}}$
Caudal sustrato dosificado (Q _{subs}) [m ³ /h]	$Q_{subs} \leq A_{1_{Qs}}$	$Q_{subs} > A_{1_{Qs}}$	-
Caudal de fango (Q _f) [m ³ /h]	$Q_f \leq A_{1_{Qf}}$	$Q_f \geq A_{2_{Qf}} \parallel$ $(Q_f \geq A_{1_{Qf}} \ \&\& \ \Delta Q_f / \Delta t > \gamma_{Q_f})$	$Q_f \geq A_{3_{Qf}}$

El resultado obtenido aplicando esta herramienta es un incremento de la robustez y fiabilidad del proceso de digestión y codigestión anaerobia, así como la optimización de la capacidad de tratamiento del digestor, que se traduce en una garantía de eliminación de materia orgánica y una producción homogénea de biogás. Este elemento puede ser valorizado una vez producido en aplicaciones diversas, e.g. producción de energía eléctrica mediante motogenerador o turbina instalados en el sistema, así como en aplicaciones alternativas al uso de gas natural e.g. vehículos de gas comprimido, entre otras.



RESULTADOS

El sistema SAD presentado en este trabajo está implementado en una EDAR real (sistema Granollers, Figura 2) desde Enero de 2016. Este sistema dispone de dos digestores con un volumen de 5000 m³. La sala de control de este sistema en la EDAR se muestra en la Figura 7. El SAD se integra en un sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA), formando parte de una plataforma que incluye otros sistemas de optimización relacionados con el funcionamiento integral de la EDAR (Figura 8). El sistema de monitorización está compuesto por analizadores AGV y ALK en línea ANASENSE TITRILYZER de Applitek (Figura 9). En la Figura 9 se observan los filtros metálicos (1 mm) con limpieza por aire comprimido y agua, así como las válvulas neumáticas para permutar el origen de muestra entre los dos digestores disponibles y etapas de limpieza. La pantalla de monitorización de la herramienta, incluyendo histórico de series temporales de algunos de los parámetros de interés presentados e.g. volumen del depósito de subproducto, medidas de AGV, ST, ALK y Q_{biogas} , se muestra en la Figura 10. El periodo de muestreo de AGV y ALK es de 30 minutos.

Para el caso de la EDAR de Granollers, los estados de operación y las reglas de diagnóstico asociadas a cada estado se detallan en la Tabla 2. En la pantalla del SCADA (Figura 8) también aparece la información de la tabla de diagnóstico del digestor, detallada en la Figura 5. Cómo se ha introducido en la Sección *Metodología*, en el listado de variables principales se puede observar la tendencia, estado y evolución de estas variables monitorizadas. En el escenario ilustrativo mostrado en la Figura 5 se observa como el parámetro *ALK* se encuentra en modo *Alarma*, por lo que el digestor está operando en condiciones de ANORMALIDAD. Finalmente, en la Figura 6 se visualiza un ejemplo de la evolución de la temperatura *T* del digestor considerado (i.e. *Digestor 1*), dónde se observa que durante unos días se sobrepasa el límite *A2* (i.e. 42 °C), generando así la herramienta una advertencia de temperatura en el digestor.

CONCLUSIÓN

En este trabajo se presenta un SAD de diagnóstico avanzada del proceso de digestión anaerobia en tiempo real, implementado en un sistema EDAR real en el municipio de Granollers. Este sistema permite la monitorización automática en tiempo real del proceso de digestión anaerobia en la EDAR, habilitando respuestas más rápidas y eficaces frente a desviaciones en su comportamiento en comparación a cuando el sistema se monitoriza de manera manual por parte del operador. El SAD ofrece un mecanismo de seguridad adicional en las EDAR de digestor simple o de dimensionamientos ajustados. El sistema supervisor implementado en el SCADA de planta permite una interacción más fluida del operador con el sistema de digestión, habilitando un flujo más eficaz de la información en ambos sentidos (monitorización y acción). Así, la monitorización en tiempo real permite diagnosticar y corregir fallos e.g. de sobrecarga de la digestión anaerobia en procesos de codigestión. Para asegurar un comportamiento satisfactorio, el sistema *on-line* de control de *AGV* y *ALK* requiere un mantenimiento especializado y calibrado periódico, para asegurar la bondad de la salida del sistema de supervisión presentado en este trabajo.



Figura 7. Sala de control en EDAR Granollers

Tabla 2. Variables proceso digestión, estados del proceso y reglas de diagnóstico, EDAR Granollers

Variable	Normal	Advertencia	Alarma
Tiempo de residencia hidráulico (TRH) [d]	$TRH \geq 20$	$TRH \leq 18$ ($TRH \leq 20$ && $\Delta TRH/\Delta t < -0,25$)	$TRH \leq 16$
Carga de sólidos totales (ST) [kg/d]	$ST \leq 9000$	$ST \geq 9500$ ($ST \geq 9000$ && $\Delta ST/\Delta t > 0.25$)	$ST \geq 10000$
Temperatura (T) [C°]	$37 \leq T \leq 40$	$T \geq 42$ $T \leq 36$ ($T \geq 40$ && $\Delta T/\Delta t > 0.15$)	$T \geq 44$ $T \leq 35$
Ácidos grasos volátiles (AGV) [mg C ₂ H ₄ O ₂ /L]	$AGV \leq 165$	$AGV \geq 170$ ($AGV \geq 165$ && $\Delta AGV/\Delta t > 0.03$)	$AGV \geq 175$
Alcalinidad (ALK) [mgC _a CO ₃ /L]	$ALK \geq 2500$	$ALK \leq 2250$ ($ALK \leq 2500$ && $\Delta ALK/\Delta t < -0.25$)	$ALK \leq 2000$
Caudal de biogás (Q_{biogas}) [Nm ³ /h]	$Q_{biogas} \geq 120$	$Q_{biogas} \leq 110$ ($Q_{biogas} \leq 120$ && $\Delta Q_{biogas} / \Delta t < -0.25$)	$Q_{biogas} \leq 100$
Relación AGV/ALK	$AGV/ALK \leq 0.07$	$AGV/ALK \geq 0.1$ ($AGV/ALK \geq 0.07$ && $\Delta(AGV/ALK)/\Delta t > 0.25$)	$AGV/ALK \geq 0.15$
Relación ALK/Q_{biogas}	$ALK/Q_{biogas} \leq 1.1$	$ALK/Q_{biogas} \geq 0.32$ ($ALK/Q_{biogas} \geq 1.1$ && $\Delta(ALK/Q_{biogas})/\Delta t > 0.25$)	$ALK/Q_{biogas} \geq 1.3$
Relación ALK/ST	$ALK/ST \leq 0.3$	$ALK/ST \geq 0.32$ ($ALK/ST \geq 0.3$ && $\Delta(ALK/ST)/\Delta t > 0.25$)	$ALK/ST \geq 0.34$
Caudal sustrato dosificado (Q_{subs}) [m ³ /h]	$Q_{subs} \leq 10$	$Q_{subs} > 10$	-
Caudal de fango (Q_f) [m ³ /h]	$Q_f \leq 100$	$Q_f \geq 110$ ($Q_f \geq 100$ && $\Delta Q_f/\Delta t > 0.25$)	$Q_f \geq 120$

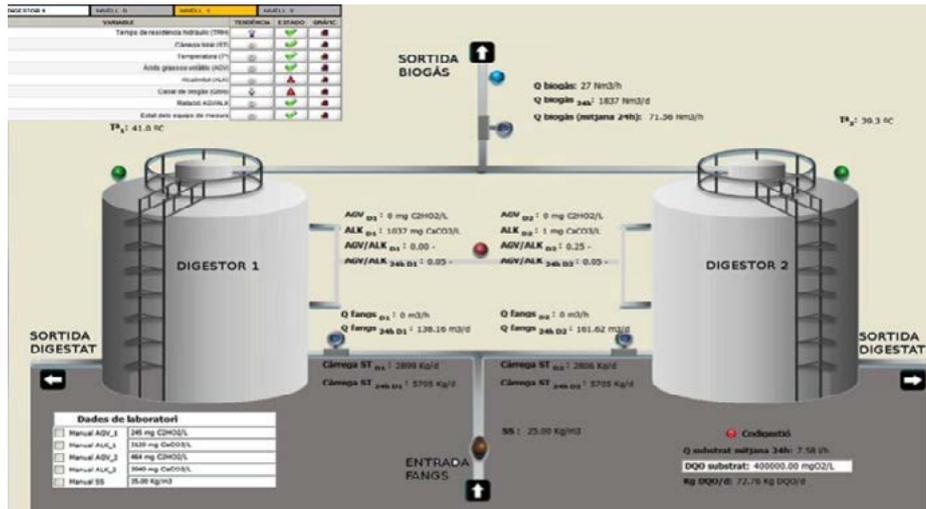


Figura 8. Pantalla SCADA EDAR Granollers



Figura 9. Analizador en línea de AGV y ALK ANASENSE TITRILYZER de Applitek (verde), filtro metálico de 1 mm con limpieza por aire comprimido y agua (azul) y válvulas neumáticas para permutar origen de muestra de Digestión 1 a Digestión 2 y etapas de limpieza (rojo)

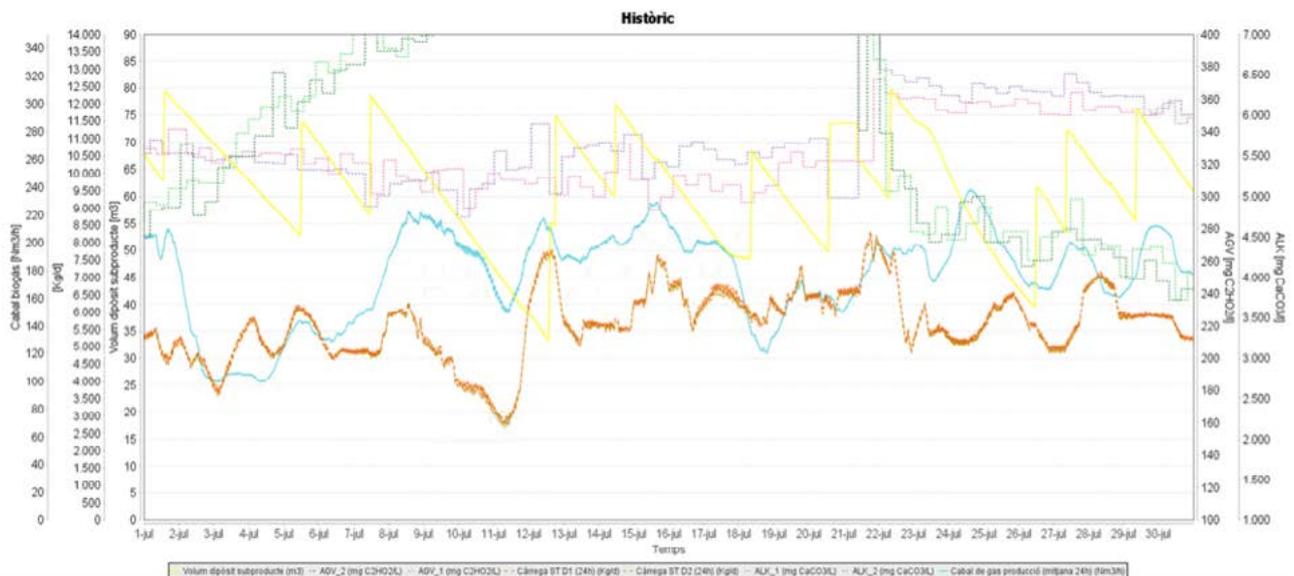


Figura 10. Pantalla monitorización herramienta

REFERENCIAS

- Aguiló, P. (2016). Producción y utilización del Gas Combustible de Digestión. Madrid: XXXIV Curso CEDEX de Tratamiento de Aguas Residuales y Explotación de Estaciones Depuradoras.
- Baldwin, J. (2008). Bio-methane fuelled vehicles. In *Claverton Energy Group Conference*. Bath, UK.
- Capodaglio, A. G., Jones, H. V., Novotny, V., & Feng, X. (1991). Sludge bulking analysis and forecasting: Application of system identification and artificial neural computing technologies. *Water Research*, 25(10), 1217–1224. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354\(91\)90060-4](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354(91)90060-4)
- Chakrabarti, S., Ester, M., Fayyad, U., Gehrke, J., Han, J., Morishita, S., ... Wang, W. (2006). *Data mining curriculum: a proposal, Version 1.0*. www.Kdd.Org/Curriculum/. Retrieved from http://www.kdd.org/exploration_files/CURMay06.pdf
- Czogaa, E., & Rawlik, T. (1989). Modelling of a fuzzy controller with application to the control of biological processes. *Fuzzy Sets and Systems*, 31(1), 13–22. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0165-0114\(89\)90063-8](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0165-0114(89)90063-8)
- Dean, J. (2014). *Big Data, Data Mining and Machine Learning: Value Creation for Business Leaders and Practitioners* (Vol. 41). John Wiley and Sons. <https://doi.org/10.1126/science.1247727>
- Han, J., & Kamber, M. (2000). *Data Mining: Concepts and Techniques (The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems)*. Morgan Kaufmann.
- Karr, C. (1991). Genetic Algorithms for Fuzzy Controllers. *AI Expert*, 6(2), 26–33. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=129459.129463>
- Quinlan, J. R. (1986). Induction of Decision Trees. *Machine Learning*, 1(1), 81–106. <https://doi.org/10.1023/A:1022643204877>
- Reina, J. (2007). Biogás para la automoción (BPA) o su inyección en la red de gas natural (BPR). *InfoEnviro*, 45–47.
- Sánchez-Marrè, M. (1996). *DAI-DEPUR: an integrated supervisory multi-level architecture for wastewater treatment plants*. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- Sánchez, M., Cortés, U., Lafuente, J., Roda, I. R., & Poch, M. (1996). DAI-DEPUR: An integrated and distributed architecture for wastewater treatment plants supervision. *Artificial Intelligence in Engineering*, 10(3), 275–285. [https://doi.org/10.1016/0954-1810\(96\)00004-0](https://doi.org/10.1016/0954-1810(96)00004-0)
- Serra, P. (1993). *Development of a Knowledge-Based System for Control and Supervision of Urban Wastewater Treatment Plants*. Universitat Autònoma de Barcelona.
- Stock, M. (1989). *AI in Process Control*. New York: McGraw-Hill.
- Witten, I. H., Frank, E., Hall, M. A., & Pal, C. J. (2016). *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques* (4th ed.). Burlington, MA: Morgan Kaufmann.

CONTACTO

Pere Aguiló Martos
 Empresa Consorci Besòs - Tordera
 Av. Sant Julià, 241
 93 840 52 70
paguilo@besos-tordera.cat

