

Desarrollo de un gemelo digital para el control en tiempo real para la estabilidad de la digestión anaerobia



Juan Emilio Castro Torres, Carlos Escamilla Alvarado, Kenia A. Carrillo Verástegui

1. INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos orgánicos para producir energías renovables es uno de los desafíos ambientales más críticos en zonas urbanas. La digestión anaerobia (DA) es una alternativa prometedora que valoriza estos residuos mediante la producción de biogás.

Sin embargo, la estabilidad de la DA es sensible a la carga orgánica. Sustratos de alta densidad energética (vinazas, residuos alimentarios) provocan acumulación de Ácidos Grasos Volátiles (AGV), caída del pH e inhibición de las arqueas metanogénicas.

Modelos robustos como el AM2 (Bernard et al., 2001) existen, pero su implementación en plantas a pequeña escala es limitada por la falta de monitoreo en tiempo real y la dependencia de análisis de laboratorio lentos.

2. OBJETIVO

Desarrollar e implementar un gemelo digital de bajo costo para un reactor anaerobio de flujo intermitente, integrando el modelo dinámico AM2 con un sistema IoT que permita detectar estados de inhibición antes del colapso del biorreactor.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Reactor

Biorreactor de Lote Secuencial de 1 L. Mezclado con turbina de aspas inclinadas con diseño basado en McCabe. Inóculo: 0.6 L de lodo anaerobio de PTAR. Operación bajo pulsos frecuentes de 20 mL cada 2 h.

3.2 Arquitectura IoT (ESP32)

- **Microcontrolador:** ESP32-WROOM-32D
- **pH:** sonda BNC + módulo PH-4502C + ADC ADS1115 (16 bits)
- **Temperatura:** DS18B20 (One-Wire), tira calefactora 24 V
- **Actuación:** motorreductor DC con driver L298N, bombas peristálticas 24 V, módulo de relevadores 2 canales
- **Biogás:** sensor de nivel por conductividad eléctrica
- **Interfaz:** pantalla OLED SSD1306; potencia 24 V 5 A + lógica 5 V 5 A

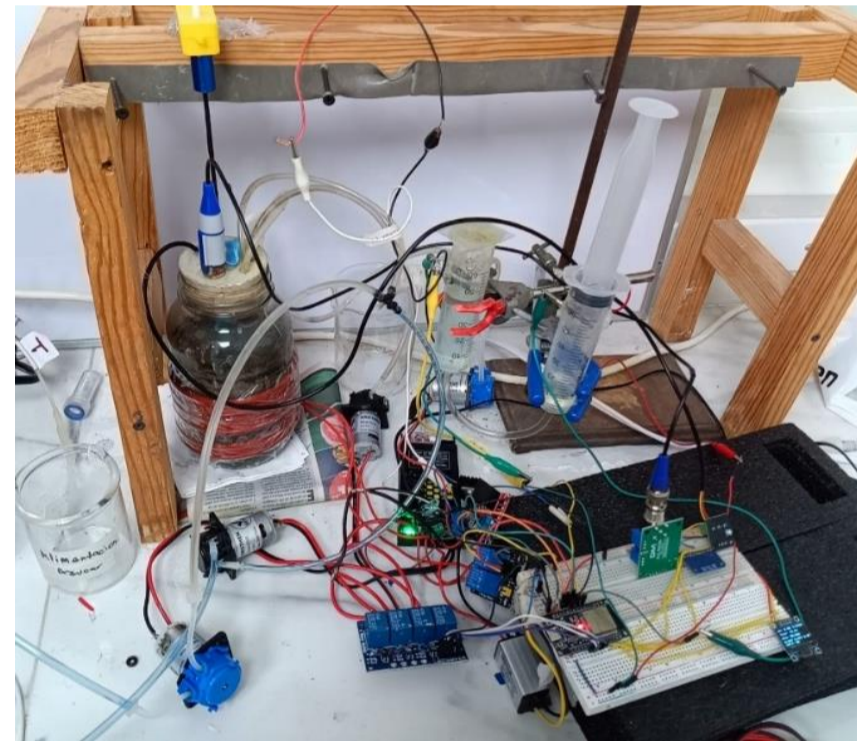


Fig. 1. Montaje del reactor

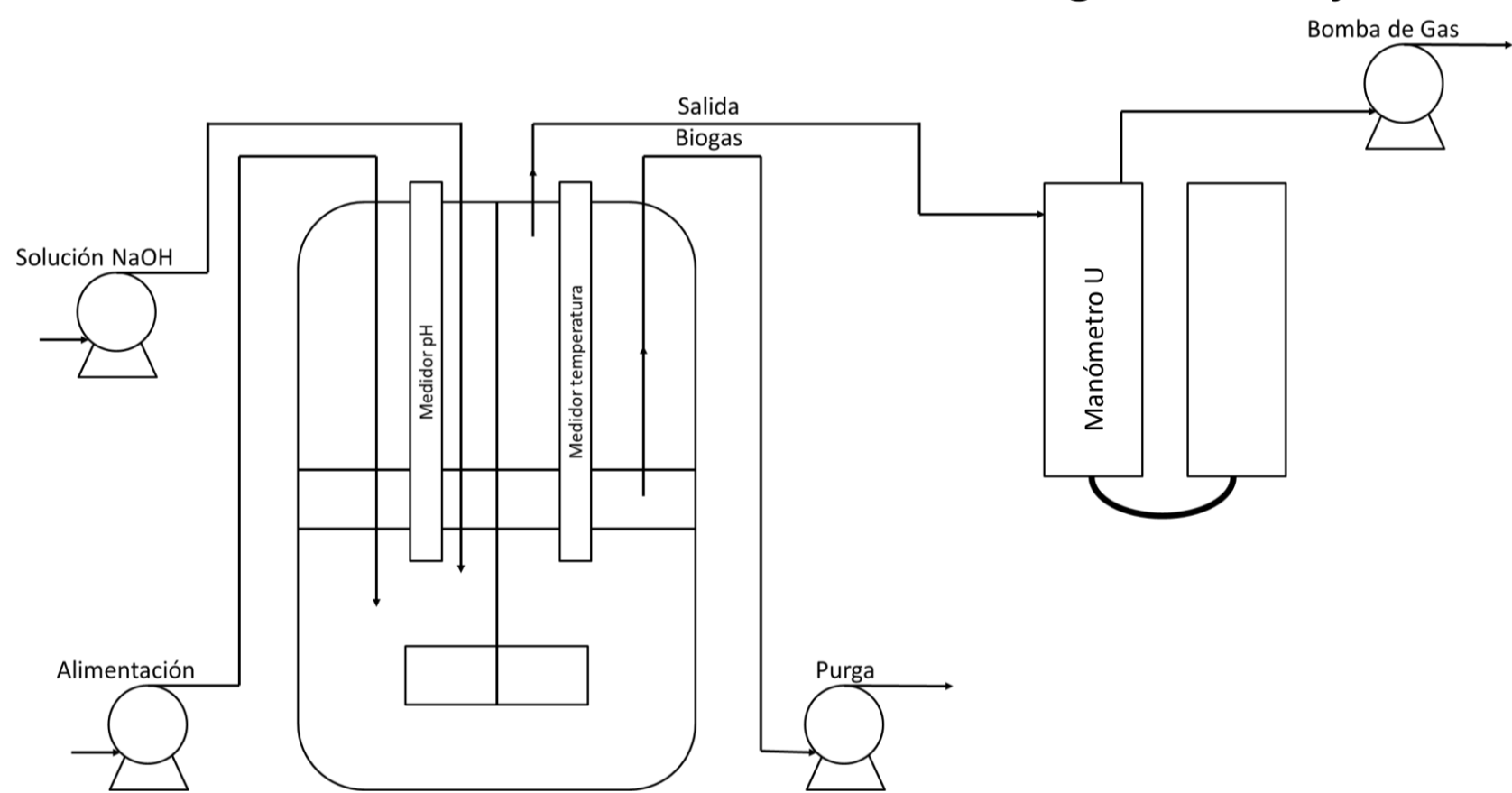


Fig. 2. Diagrama del montaje

4. IMPACTO Y APLICACIONES

Impacto ambiental

- Valorización de residuos orgánicos, como vinazas, residuos de alimentos, aguas agroindustriales, como fuente de energía renovable.
- Reducción de emisiones de metano por gestión activa vs. disposición en relleno sanitario.
- Integración a esquemas de biorrefinería: biogás + digestato como fertilizante estabilizado.

Impacto social y económico

- Hardware accesible frente a sistemas SCADA comerciales.
- Aplicable a plantas a pequeña escala, comunidades rurales y proyectos de investigación con bajo presupuesto.

Ética y reproducibilidad

- Diseño abierto: código, esquemáticos y dashboard publicados para validación independiente.
- Datos en tiempo real publicados en ingequimico.com/reactorDA.html

8. APLICACIÓN

En municipios donde se dispone de una red de parques urbanos con contenedores de separación de residuos, facilita la captación directa de la FORSU (Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos: poda, hojarasca y jardinería) como sustrato del reactor anaerobio.

El tratamiento in situ de los residuos reduce el volumen enviado al relleno sanitario, disminuyendo costos de transporte y emisiones de metano no controladas en la disposición final.

La modularidad del reactor permite escalar por etapas: iniciar con una unidad piloto en un parque representativo y replicarla según la generación local, sin infraestructura centralizada.

El biogás generado se aprovecha en el propio parque y el digestato como abono para las áreas verdes, cerrando el ciclo en el municipio.

6. MODELO AM2

El modelo AM2 (Bernard et al., 2001) reduce la DA a un sistema de 6 ecuaciones diferenciales ordinarias y 2 etapas biológicas (acidogénesis y metanogénesis), capturando la dinámica del ADM1 con menos parámetros – compatible con control en línea y hardware de bajo costo.

Sistema de ecuaciones diferenciales

$$\begin{aligned} \text{Ec. 1 Biomasa acidogénica} & \quad \frac{dX_1}{dt} = [\mu_1(\xi) - \alpha D]X_1 \\ \text{Ec. 2 Biomasa metanogénica} & \quad \frac{dX_2}{dt} = [\mu_2(\xi) - \alpha D]X_2 \\ \text{Ec. 3 Alcalinidad total} & \quad \frac{dZ}{dt} = D(Z_{in} - Z) \\ \text{Ec. 4 Sustrato orgánico} & \quad \frac{dS_1}{dt} = D(S_{1in} - S_1) - k_1\mu_1(\xi)X_1 \\ \text{Ec. 5 AGVs} & \quad \frac{dS_2}{dt} = D(S_{2in} - S_2) + k_2\mu_1(\xi)X_1 - k_3\mu_2(\xi)X_2 \\ \text{Ec. 6 Carbono inorgánico} & \quad \frac{dC}{dt} = D(C_{in} - C) - q_C(\xi) + k_4\mu_1(\xi)X_1 + k_5\mu_2(\xi)X_2 \end{aligned}$$

Cinéticas de crecimiento

$$\begin{aligned} \text{Ec. 7 Monod (acidogénicas)} & \quad \mu_1(S_1) = \frac{\mu_{1max} \cdot S_1}{S_1 + K_{S1}} \\ \text{Ec. 8 Haldane (metanogénicas)} & \quad \mu_2(S_2) = \frac{\mu_{2max} \cdot S_2}{K_{S2} + S_2 + \frac{S_2^2}{K_{I2}}} \end{aligned}$$

La validación de los estados estimados por el gemelo digital se realizó mediante pruebas de laboratorio:

Alcalinidad Total, Z: Determinada mediante titulación potenciométrica con HCl 0.1 M hasta alcanzar un punto final de pH 4.3.

Ácidos Grasos Volátiles, S₂: Determinados mediante la técnica de titulación con NaOH 0.1 M, permitiendo cuantificar la concentración de ácidos orgánicos acumulados.

Sólidos: Se realizaron pruebas de Sólidos Volátiles y Sólidos Totales para la estimación inicial de la DQO y la biomasa activa presente en el reactor.

7. RESULTADOS

Se contrastan las predicciones del modelo AM2 con los datos experimentales del reactor anaerobio. Las gráficas muestran la evolución de sustratos, biomasa acidogénica y metanogénica, producción de biogás y el comportamiento del pH frente a la inhibición, permitiendo identificar la ventana operativa estable y el punto de inflexión del sistema.

- **Modo de fallo identificado:** la cinética Monod (X₁) crece más rápido que la Haldane (X₂) → acumulación de AGV → consumo de alcalinidad → caída abrupta de pH en t ≈ 12.5 d.
- **Ajuste cualitativo:** el modelo reproduce orden de magnitud y tendencia de biogás y la ventana operativa de pH, pero su perfil lineal sobreestima la fase inicial.
- **Limitaciones:** parámetros tomados de literatura, no recalibrados para este sustrato; sin lazo de control de pH ni de carga; un único ensayo experimental sin réplicas.
- **Valor del gemelo digital:** aun con desviaciones cuantitativas, anticipa el punto de inflexión del sistema y permite diseñar estrategias de control antes del colapso.

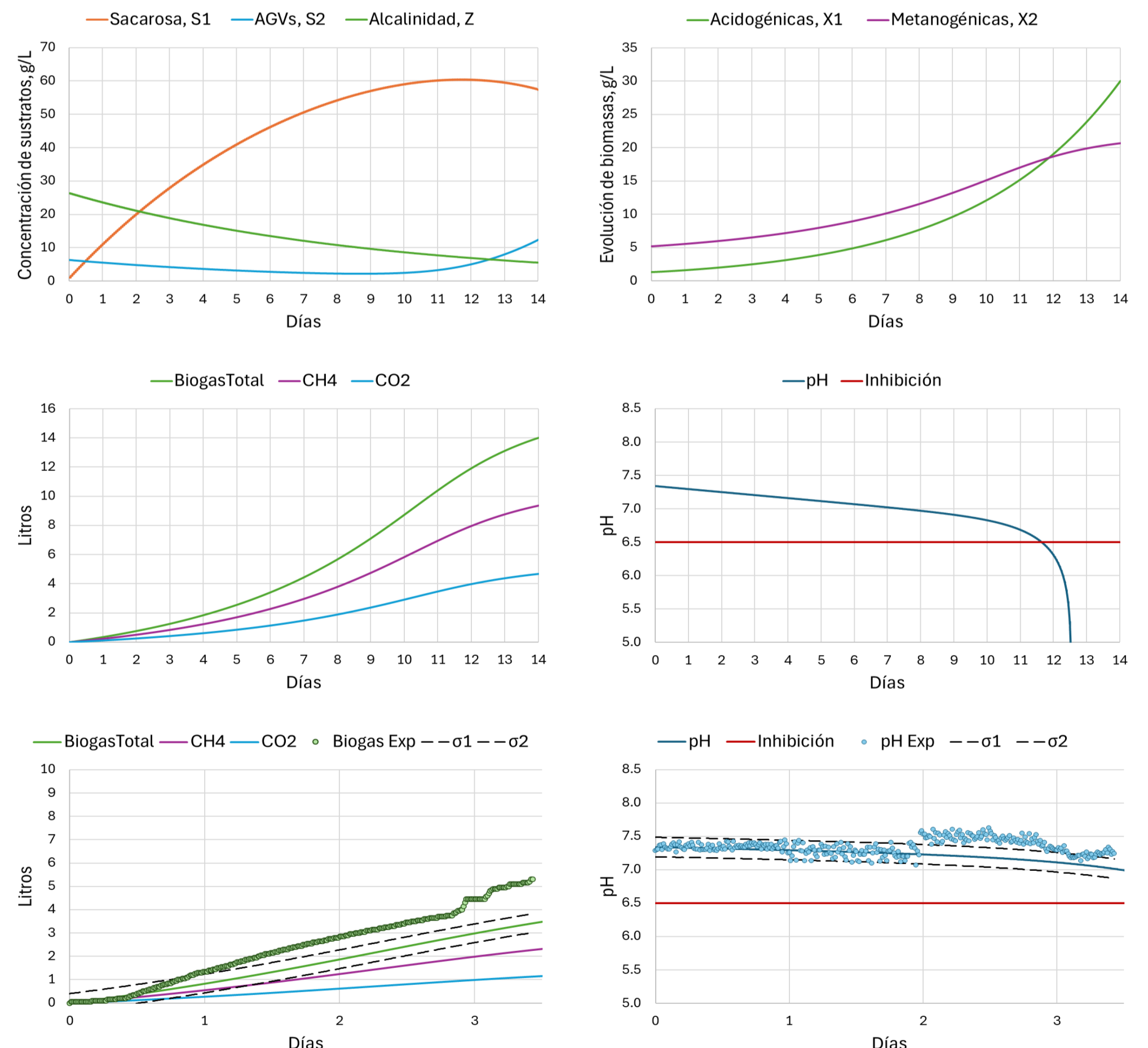


Fig. 3. Resultados de la simulación y datos experimentales

9. CONCLUSIONES

- Se implementó un gemelo digital basado en AM2 que reproduce la dinámica acidogénesis-metanogénesis del reactor anaerobio.
- La simulación captura la ventana operativa estable (pH 6.7–7.3) y predice el punto de inflexión (t ≈ 12.5 d) ante sobrecarga sin control activo.
- El biogás acumulado (CH₄ 9.34 L, CO₂ 4.67 L, relación 2:1) y la tendencia de pH muestran concordancia cualitativa con los datos experimentales, validando la estructura del modelo.
- Las desviaciones detectadas son corregibles vía recalibración paramétrica, sentando la base para un gemelo digital con sensores en tiempo real y control predictivo.