# INFORME TÉCNICO

# PROYECTO COOPERACIÓN

## Desarrollo de proceso de residuos de explotación porcina ibérica (2011 - 2015) (EXP. Nº: SA/08/0062/S21)

AUTORES:

Universidad de Salamanca : Vidal Moreno Rodilla
Raúl Alves Santos
Belén Curto Diego

Biogás Pata Negra, S. L. : Esther Herrera Diego

## Fase 1. Diseño del fermentador para la digestión anaerobia

La planta piloto (Figura 1) donde se llevará a cabo el proceso de digestión anaerobia consta de:

a) Un reactor anaerobio con camisa y continuamente agitado (reactor de mezcla completa sin recirculación)
El recipiente de fermentación se ha diseñado con forma cilíndrica con una altura de 36 cm, útiles para llenado hasta 32 cm, y un diámetro de 24.5 cm para conseguir un volumen de trabajo aproximado de 15 litros.
Dispone de una camisa por la que circula agua para intercambio de calor, con un volumen de 5 litros.
Se ha establecido un tiempo de residencia hidráulico de unos 30 días.
Para garantizar condiciones de homogeneidad en el reactor, se ha incluido un agitador mecánico de acero con un motor con reductora.
En el diseño del recipiente también se ha incluido, en la parte inferior, una salida con una bifurcación en T. Una de las vías dispondrá de una llave y servirá para extracción de muestras y el purgado del recipiente en operaciones de mantenimiento. La segunda vía estará conectada a un tubo de rebose que servirá para control del nivel del digestato.
El diseño también incluye tomas para introducir sondas, garantizando condiciones de estanqueidad a gases.

b) Un baño térmico donde se calienta agua a una temperatura de 37ºC mediante un cartucho calentador. El agua se bombeará para recircular por la camisa del reactor y producirse el intercambio de calor.
El baño térmico debe construirse con un material termoaislante para evitar pérdidas de calor.

c) Un ingestor donde se almacenen el sustrato para alimentar al reactor.
Se realizará un pre-tratamiento mecánico del sustrato mediante una trituradora industrial. Con ello se conseguirá reducir el tamaño de las partículas y el consiguiente aumento en la superficie específica disponible, lo que mejorará el proceso biológico. Los dos efectos inmediatos son una mejora en la producción de gas y digestión más rápida. Además, la trituración permite que la bomba peristáltica trabaje mejor y que no se produzcan atascos en las tuberías y elementos de acople. La trituradora no funcionará en continuo y evitará que el sustrato sedimente.
Para la alimentación del reactor se dispondrá de una bomba peristáltica con velocidad regulable. Dado que se ha estimado un caudal de alimentación de 500 ml/día, la bomba no funcionará en continuo.

d) Un depósito/bolsa para recoger y almacenar el gas.
A la salida de gases del reactor se ha incluido una bifurcación en T. En la primera vía se colocará la bolsa de almacenaje de gas. La segunda vía se debe sumergir en un depósito de agua para servir como sistema de seguridad ante el llenado de la bolsa.

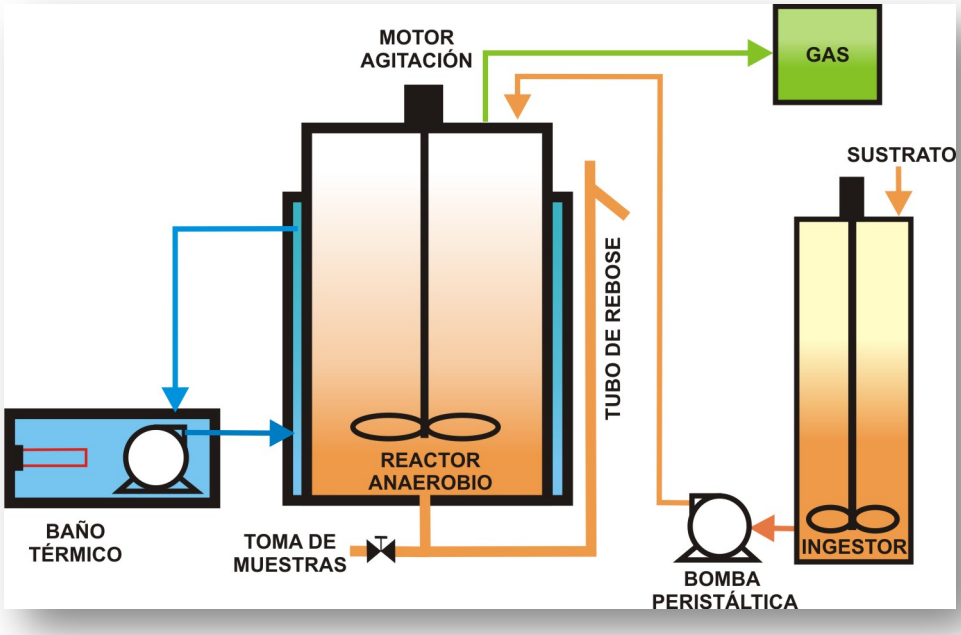



Figura 1.- Diseño de la planta piloto

En la Figura 1 se ha utilizado el siguiente código de colores:

- Azul para los flujos de agua
- Naranja para el flujo de digestato
- Verde para el flujo de biogás

## Fase 2. Diseño del sistema de control

En el diseño del sistema de control es necesario establecer junto a los objetivos de control, qué variables se pueden manipular y cuáles se pueden medir. A continuación nos centramos en el reactor junto con el baño térmico y en el ingestor.

Control de temperatura del reactor

Para que se lleve a cabo el proceso de DA es necesario conseguir que las bacterias se encuentren en unas condiciones de temperatura y pH determinadas. Por ello se diseñará un sistema de control en cascada cuyas principales características son:

- Variable controlada: temperatura en el interior del fermentador.
- Variable manipulada: la temperatura del baño térmico.
- Lazo de control en cascada:
    - El lazo externo mide la temperatura real en el reactor y fija la referencia del lazo interno. La consigna/referencia se establece en 37ºC
    - El lazo interno se encarga de controlar la temperatura en el baño térmico. Mide la temperatura real del agua y manda la señal al cartucho del calentador. Mediante la bomba sumergida se recircula el agua por la camisa del reactor.

Será necesario introducir una sonda de temperatura en el reactor y otra en el baño térmico, para disponer de medidas de temperatura de ambos, que se utilizarán en los controladores

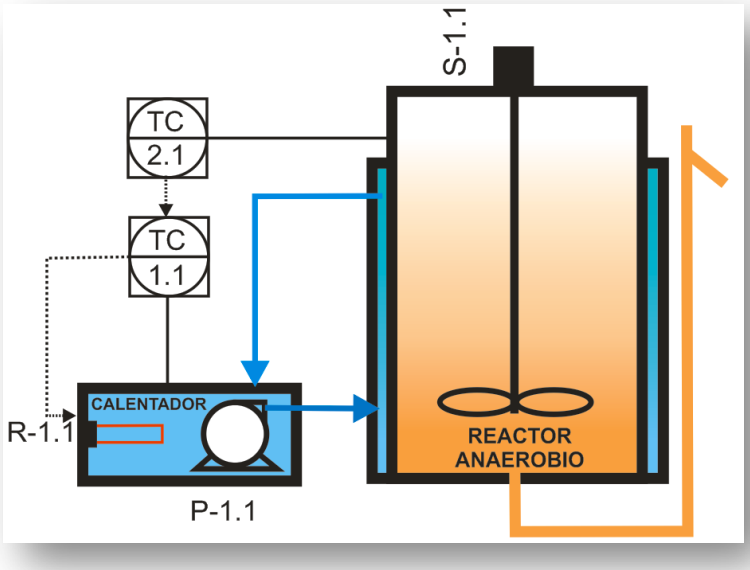



Figura 2.- Esquema de control de temperatura en el reactor

La homogeneidad en la temperatura y en composición también es fundamental para el proceso DA. Por ello, se dispone en el reactor de un agitador el cual debe funcionar a velocidad constante. Mediante un variador de frecuencia se podrá establecer la velocidad de agitación, que es configurable.

En la Figura 2 se muestra el control en cascada de la temperatura en el reactor mediante los controladores TC-2.1 (lazo externo) y TC-1.1 (lazo interno). Aparecen los elementos de actuación como son la resistencia/cartucho del calentador R-1.1, la bomba sumergida P-1.1 y el motor de agitación S-1.1.

Como dispositivo de seguridad en el baño térmico se incorporará un elemento para mantener un nivel mínimo de agua, de forma que se garantice que la resistencia esté siempre sumergida y evitar el funcionamiento en vacío de la bomba de recirculación de agua caliente. Se tratará de un dispositivo de medida de nivel de tipo boya de flotación. Cuando el nivel del agua esté por debajo de un nivel de seguridad el sistema debe desactivar el lazo interno para apagar la resistencia y desactivar la bomba. Con este dispositivo de seguridad se evitarán daños en ambos actuadores.

Alimentación del digestor

En el ingestor se realiza un pre-tratamiento mecánico del sustrato mediante una trituradora industrial, cuya finalidad se ha comentado previamente. La alimentación del digestor se realizará con un caudal que se ha estimado en 500 ml/día. Debido a que se necesita un caudal tan bajo, la bomba peristáltica con velocidad regulable no funcionará en continuo. La trituradora trabajará de forma no continua para evitar la sedimentación del sustrato.

En la Figura 3 se muestra el esquema para la alimentación del reactor, mediante una trituradora industrial B-1.1 y la bomba peristáltica P-3.1.

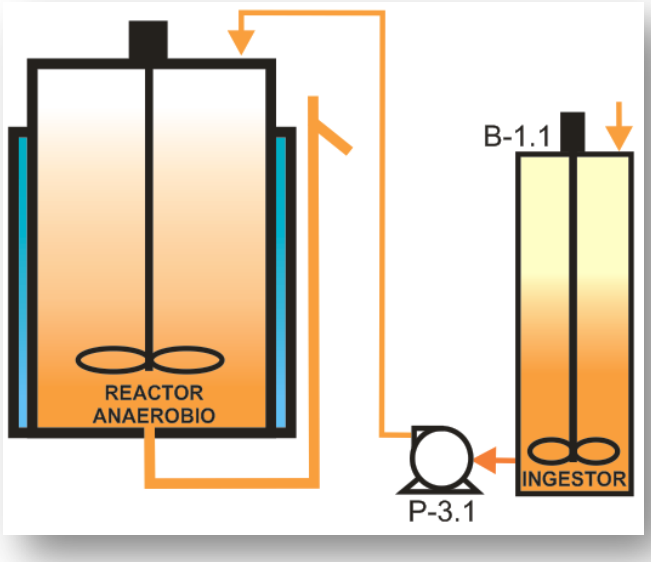



Figura 3.- Esquema del ingestor

Se ha diseñado una secuencia de trituración y bombeo (

Figura 4) que consistirá en:

- Activar la trituradora de forma periódica durante un intervalo de tiempo. Tanto el periodo como el tiempo de activación serán configurables.
- Repetir el proceso de trituración un número determinado de veces antes de comenzar el bombeo. Este número será configurable.
- Como el bombeo se debe realizar mientras se tritura para evitar la sedimentación, se debe establecer un tiempo de espera (configurable) entre el comienzo de la trituración y el comienzo del bombeo.
- Bombear durante un tiempo a una determinada velocidad. Estos parámetros deben de ser configurables.

Por tanto, los parámetros configurables serán:

- Periodo de trituración
- Tiempo de trituración
- Repeticiones de batido antes de bombeo
- Espera antes de bombeo
- Tiempo de bombeo
- Velocidad de bombeo

Conociendo el caudal aportado por la bomba a una determinada velocidad y para determinada sección de tubería, es posible ajustar los parámetros configurables para establecer la cantidad de sustrato que se introducirá en un día en el reactor.

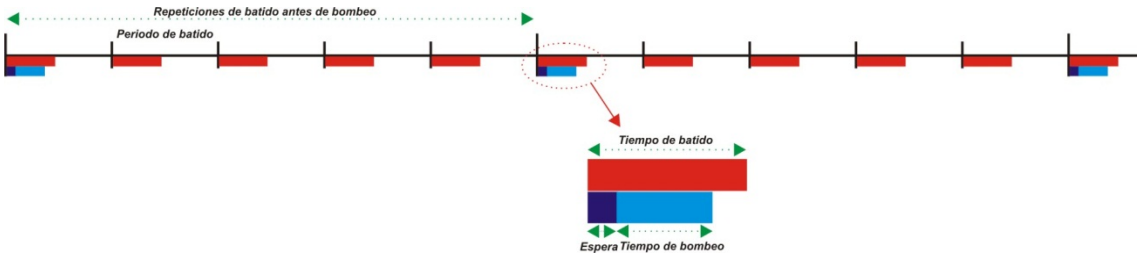



Figura 4.- Secuencia de trituración y bombeo

Variables monitorizadas

Una vez definido el sistema de control de temperatura del reactor y la alimentación del mismo, es importante definir las variables que hay que monitorizar por su relevancia dentro del proceso.

Las variables más importantes a monitorizar son la temperatura del reactor, el pH del reactor y el caudal de gas que está produciendo, tal y como se muestra en la Figura 6.

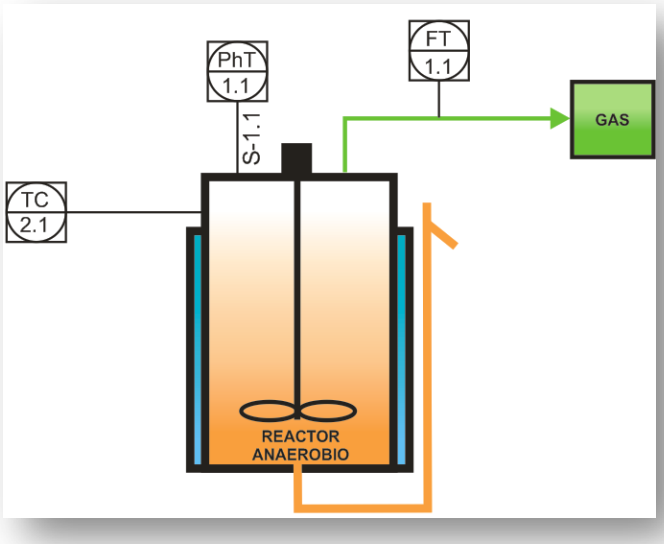
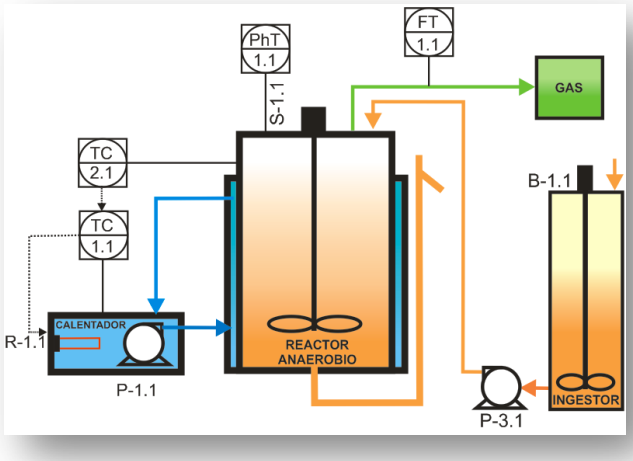



**Figura 6.- Variables monitorizadas en el reactor**

Esquema completo de la planta piloto

Con el fin de realizar la experimentación y dado que el proceso de digestión anaerobia es un proceso muy lento que puede durar alrededor de 1 mes, se ha decidido construir dos plantas gemelas para facilitar la de ensayos en la fase de pruebas.



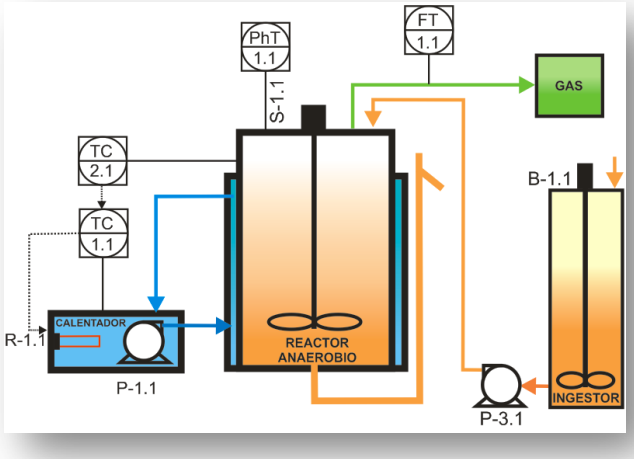



Figura 7.- Plano de control de ambas plantas gemelas

Sistema SCADA

Se utilizará un sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) para el control, monitorización y supervisión de las plantas. Este sistema (Figura 8) estará integrado por los siguientes componentes hardware y software:

- Un PLC (*Programmable Logic Controller*) que se encargará de realizar:
  - el control a nivel de lazo del digestor
  - control secuencial de la alimentación desde el ingestor
  - el arranque y parada de las plantas
- Unidades que conectan con la instrumentación de campo para la conversión de señales
- Sistema supervisor para comunicar con dispositivos de campo y con software HMI (Human-Machine Interface) para que el operador humano monitorice la planta
- HMI local y remoto
- Infraestructura de comunicación

Además, el sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) permitirá a su vez guardar históricos de las plantas y permitirá la monitorización/supervisión remota desde otras instalaciones de la empresa situadas a decenas de kilómetros.

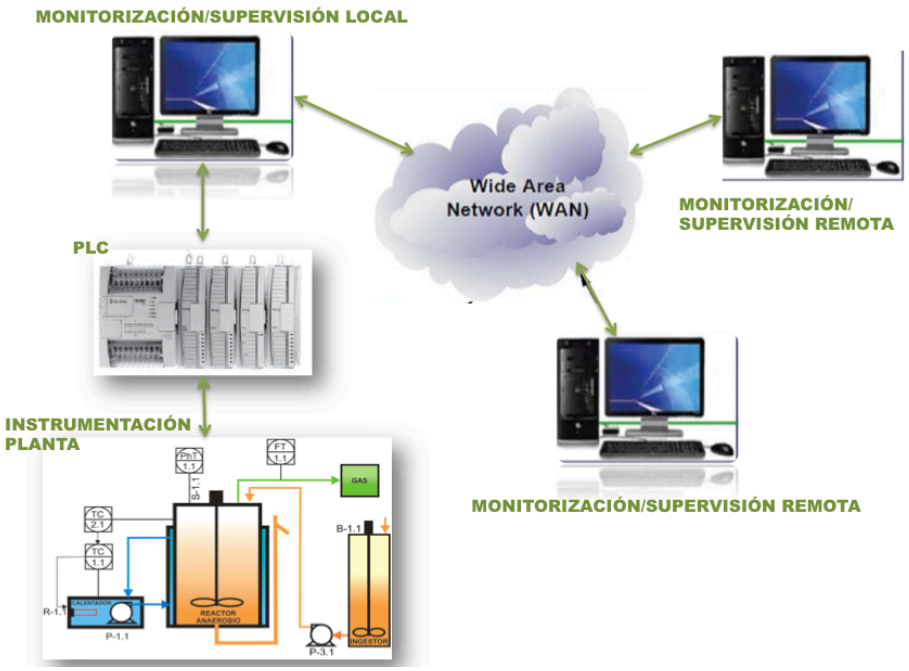



Figura 8.- SCADA

## Fase 3. Instrumentación de la planta

A partir del diseño realizado, en la Tabla 1 se muestra la instrumentación elegida teniendo en cuenta las necesidades específicas y los costes de adquisición y disponibilidad. El listado se ha separado considerando los diversos equipos: el reactor anaerobio, el baño térmico y el ingestor. La Tabla 1 corresponde a la instrumentación empleada en la planta1, donde aparece la referencia indicativa al instrumento, el tipo y fabricante, la función que realiza dentro de la planta junto con el tipo de señal que maneja y una imagen.

**Tabla 1.- Instrumentación seleccionada**

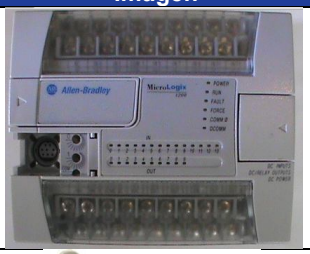
| **Reactor Anaerobio** | | | |
|---|---|---|---|
| **Leyenda** | **Fabricante** | **Función/Descripción** | **Imagen** |
| pHT-1.1 | Sonda de pH Fabricada por Chemitec 42Series | Medida del pH del reactor en escala 0 a 14pH. Proporciona medida en 4-20mA. | |
| TC-2.1 | Sonda de Temperatura | Medida de la temperatura dentro del reactor. Salida analógica RTD. | |
| FT-1.1 | Caudalímetro de gases Fabricado por Biovec | Medida del caudal de gas generado, basada en el principio de cazoleta inversa (*Milligascounter*). Conexión a PLC por señal de pulsos | |
| S-1.1 | Agitador | Agitador con motor trifásico con velocidad controlada por un variador de frecuencia. | |
| **Baño térmico** | | | |
| TC-1.1 | Sonda de Temperatura | Mide la temperatura del agua en el baño térmico. | |
| P-1.1 | Bomba de recirculación | Bomba alimentada a 220V, sin posibilidad de regulación de caudal. Se controlará solamente su encendido y apagado para que no funcione en vacío. | |
| L-1.1 | Sensor de nivel de agua | Sensor de nivel tipo boya que permitirá apagar la bomba y la resistencia cuando se alcance el nivel mínimo. | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| R-1.1 | Calentador de cartucho Fabricado por Under Control Instruments 724-2113 | Resistencia 600w para la calentamiento de agua. Funcionamiento a 220V, sin posibilidad de regulación de intensidad. Se controlará el encendido y el apagado a fin de controlar la temperatura del baño térmico. | |
| **Ingestor** | | | |
| P-3.1 | Bomba peristáltica Fabricada por DINCO MOD. D25VT | Bomba peristáltica para alimentación del digestor con caudal bajo. Funciona a 220V con motor 240rpm. Posibilidad de regulación de caudal mediante entrada 0-10V. | |
| B-1.1 | Trituradora industrial<br><br>Marca Sammic modelo TR-550BXL | Trituración del sustrato. Alimentación a 220V sin posibilidad de regulación de velocidad. De 0,55 kW de potencia y de 9000 rpm | |

**Equipo de control**

Para la automatización y control de la planta se ha elegido un PLC (*Programmable Logic Controller*) de Allen Bradley con un conjunto de módulos de entrada/salida para la conexión de los sensores y actuadores.

Tabla 2.- Módulos de control de ambas plantas

| Marca/Modelo | Descripción | Imagen |
|---|---|---|
| Allen Bradley Micrologix 1200 | PLC que incluye CPU, conexiones de entrada y salida, puerto de comunicaciones, alimentación |  |
| Allen Bradley 1762-IF4 | Módulo de 4 entradas analógicas 0-10V, 4-20mA | |

| | | |
|---|---|---|
| Allen Bradley 1762-OF4 | Módulo de 4 salidas analógicas 0-10V, 4-20mA | |
| Allen Bradley 1762-IR4 | Módulo de 4 entradas analógicas RTD | |
| Allen Bradley 1762-OF4 | Módulo de 4 salidas analógicas 0-10V, 4-20mA | |
| Variador | Controlador de motor trifásico. La velocidad de motor puede ser controlada mediante una señal externa de 0-10v. | |

## Fase 4. Construcción de equipos de la planta piloto

A continuación describimos los equipos que se han construido.

**Digestores**

Dos unidades AD de 15 litros de capacidad realizadas en policarbonato con base y tapa de acero inoxidable. Dimensiones 30 cm de diámetro y 36 cm de altura. Compuesto por

- Base de policarbonato con patas elevadas.
- Digestor y camisa de calefacción en policarbonato.
- Varillas de soporte y fijación para tapa de 8 mm en inoxidable con rosca en la parte superior.
- Arandela de sujeción de tapa.
- Tapa superior que incluye
    - Conexión roscada 1⁄4 “ para sonda de temperatura
    - Conexión roscada 1⁄4 “ para sonda de pH
    - Conexión para manguito flexible entrada
    - Conexión para manguito salida de gas
    - Motor + reductora para el agitador con guarda hidráulica
- Agitador realizado en acero inoxidable.
- Salida por parte inferior para vaciado, toma de muestras y control de sustrato.

Se ha comprobado la estanqueidad a gas del equipo

Figura 9.- Digestor anaerobio construido

**Baño térmico**

El sistema de calefacción del digestor está formado por piscina de agua caliente con 3 cm de aislante térmico y tapa. Dimensiones 26 x 36 x 20 cm. Incluye:

- Bomba de impulsión sumergida de calefacción
- Resistencia eléctrica
- Bandeja a nivel de cubeto de contención en caso de rotura. Incluye sistema de seguridad en nivel de agua ante desbordamiento y para protección de la resistencia.
- Tubo flexible de alimentación a la camisa del digestor.

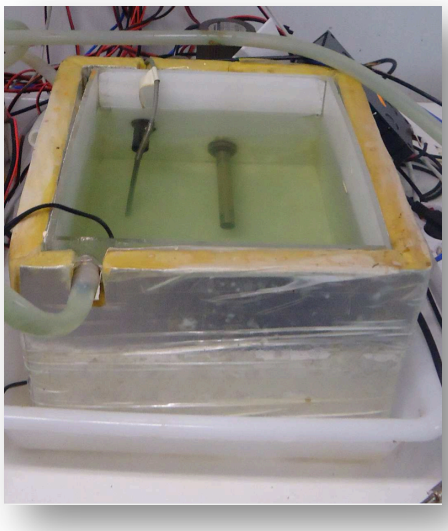


Figura 10.- Baño térmico

**Equipo de alimentación (ingestor)**

Equipo de alimentación formado por:

- Contenedor de acero inoxidable realizado con tubo de 160 mm de diámetro y 50 cm de altura apoyado sobre base de plancha de 2 mm de acero inoxidable de 30 x 40 cm. Incluye salida para tubo de alimentación flexible de 12 mm.
- Equipo de trituración y agitación formado por Sammic modelo TR-550BXL de 0,55 kW de potencia y de 9000 rpm y cuchillas trituradoras.
- Bomba de alimentación peristáltica DINCO D21V
- Tubos flexibles para transporte de biomasa.

Figura 11.- Trituradora en el ingestor

**Bolsas de almacén de gas**

Conjunto de 2 bolsas especiales para almacenar de biogás realizadas con membrana del compuesto del papel de aluminio, incluyendo válvula manual. Se incluye:

- Válvula de sobre y depresión basada en una canalización plástica con guarda hidráulica.
- Una T en la canalización: una vía hacia el analizador de biogás y otra hacia la válvula de seguridad.

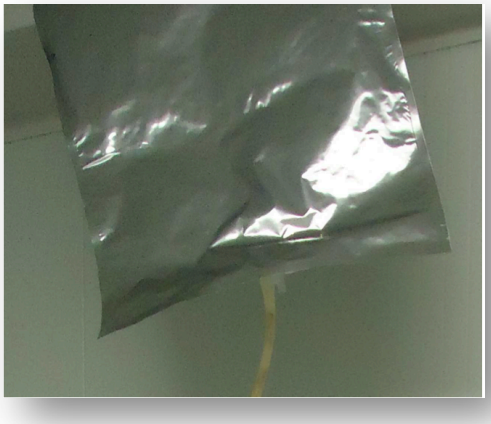


Figura 12.- Bolsas para almacén de biogás

## Fase 5.- Automatización de las plantas

**Equipo de control**

El PLC para control de la planta se encuentra alojado en un armario de poliéster con dimensiones 1,5m x 0,42m x 2m.
Incluye además:

- Protecciones y relés para el funcionamiento automático de la planta
- Variadores de frecuencia para agitación.

Figura 13.- Armario eléctrico para alojamiento del PLC

En la Tabla 3 y la Tabla 4 se va a indicar a qué módulo del PLC y a qué terminal concreto está conectado cada uno de los sensores y actuadores instalados en ambas plantas.

**Tabla 3.- Conexión de los sensores planta 1 y 2 con PLC**

| SENSORES PLANTAS 1 Y 2 | | | |
|---|---|---|---|
| **Reactor Anaerobio** | | | |
| **Sensor** | **Conectado a** | **Entrada** | **Tipo de señal** |
| PhT-1.1 | 1762-IF4 | 0 | 4-20mA |
| PhT-1.2 | 1762-IF4 | 1 | 4.20mA |
| TC-2-1 | 1762-IR4 | 0 | RTD |
| TC-2.2 | 1762-IR4 | 2 | RTD |
| FT-1.1 | Micrologix 1200 | 2 | Digital 24V |
| FT-1.2 | Micrologix 1200 | 3 | Digital 24V |
| **Calentador** | | | |
| **Sensor** | **Conectado a** | **Entrada** | **Tipo de señal** |
| TC-1.1 | 1762-IR4 | 1 | RTD |
| TC-1.2 | 1762-IR4 | 3 | RTD |
| L-1.1 | Micrologix 1200 | 0 | Digital 24V |
| L-1.2 | Micrologix 1200 | 1 | Digital 24V |

**Tabla 4.- Conexión de los actuadores planta 1 y 2 con PLC**

| ACTUADORES PLANTAS 1 y 2 | | | |
|---|---|---|---|
| **Reactor Anaerobio planta 1 y 2** | | | |
| **Actuador** | **Conectado a** | **Salida** | **Tipo de señal** |
| S-1.1 | 1762-OF4 (1) | 1 | 0-10V a Variador |
| S-1.2 | 1762-OF4 (1) | 0 | 0-10V a Variador |
| **Calentador** | | | |
| **Actuador** | **Conectado a** | **Salida** | **Tipo de señal** |
| P-1.1 | Micrologix 1200 | 3 | Digital 24 V a Relé |
| P-1.2 | Micrologix 1200 | 5 | Digital 24 V a Relé |
| R-1.1 | Micrologix 1200 | 0 | Digital 24 V a Relé |
| R-1.2 | Micrologix 1200 | 2 | Digital 24 V a Relé |
| **Ingestor** | | | |
| **Actuador** | **Conectado a** | **Salida** | **Tipo de señal** |
| P-3.1 | 1762-OF4 (2) | 1 | 0-10V |
| P-3.2 | 1762-OF4 (2) | 3 | 0-10V |
| B-1.1 | Micrologix 1200 | 1 | Digital 24 V a Relé |
| B-1.2 | Micrologix 1200 | 4 | Digital 24 V a Relé |

**Programación del PLC**

Como hemos comentado previamente, para realizar el control de la planta se ha utilizado el PLC Micrologix 1200 de Allen Bradley. La programación del PLC se ha realizado mediante el lenguaje *Ladder* a través del entorno de programación RSLogix 500 de Rockwell (Figura 14) para Windows.

El programa del PLC realiza, entre otras, las siguientes funciones:

- Control en cascada de la temperatura de los digestores
- Control secuencial de bomba de alimentación
- Control secuencial del triturador
- Establecimiento de la velocidad de agitación de los digestores
- Lectura del medidor de de gas

Según el diseño del software que hemos realizado, hay una rutina principal (LAD 2 – PRINCIPAL), y desde ésta se llamarán al resto de las subrutinas programadas que se encargan de realizar las tareas comentadas previamente.

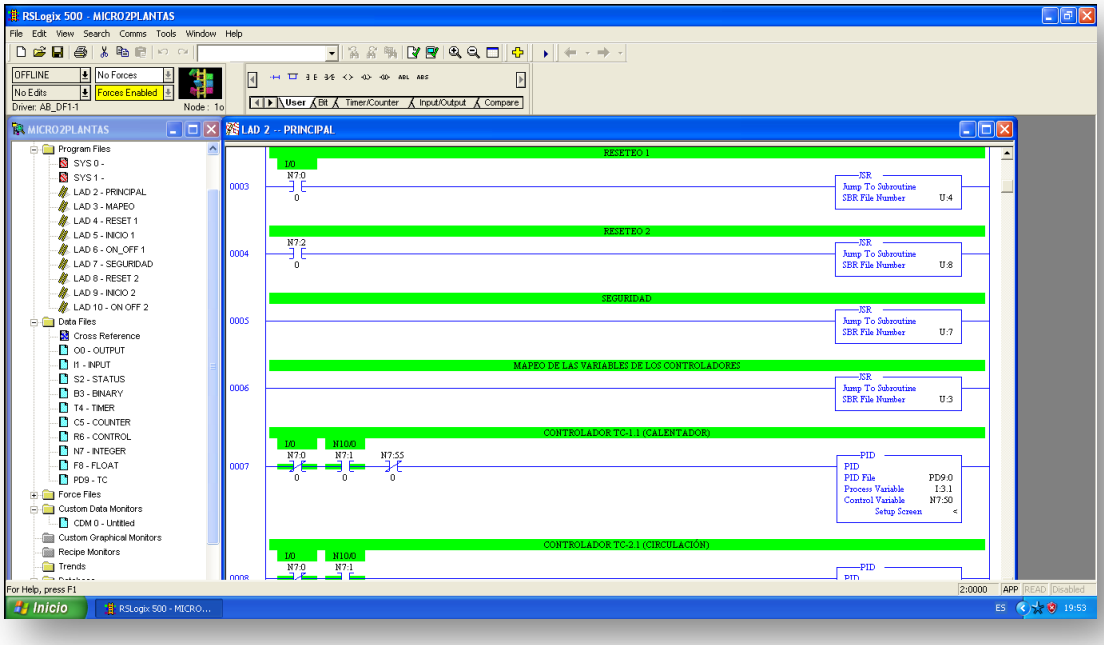



**Figura 14.- Entorno de programación RSLogix500 y aspecto de rutina *Principal***

La rutina *PRINCIPAL* se encarga de realizar las siguientes tareas:

- Al iniciarse ejecuta la subrutina *RESET* para llevar a las plantas a un estado seguro, a la espera de que el operador proceda al arranque de las plantas desde el SCADA.
- Cuando el operador pulsa el botón de "Inicio" desde la consola de monitorización/supervisión, se ejecuta la subrutina *INICIO* de la planta 1 y/o 2, dependiendo de la acción del operador.
- Cuando el operador pulsa el botón de "Reset" desde la consola, se ejecuta la subrutina *RESET* de la planta 1 y/o 2, dependiendo de la acción del operador.
- Se ejecuta la subrutina SEGURIDAD para evitar daños en la instrumentación.
- Ejecuta la subrutina *MAPEO* de variables .
- Cuando la planta 1 y/o 2 pasa a estado automático
    - Se ejecutan los controladores PID de temperatura en cascada.
    - Se ejecutan los controladores ON/OFF del baño térmico
    - Se toma la medida de los contadores de gas
    - Se realiza secuencial para activar la trituradora y la bomba peristáltica para la alimentación del reactor en función de los paramétros configurados.

Mediante la subrutina *RESET*, se realiza un *reset* de la planta, dejándola en un estado seguro a la espera de que se le indique que debe de iniciarse. Concretamente, apagará la resistencia y detiene la bomba del ingestor, el motor del agitador, la bomba de recirculación de agua caliente y los temporizadores.

Mediante la subrutina *INICIO* se realiza la inicialización de cada planta (una para cada planta). Concretamente, se establecen los valores por defecto que se han determinado para los controladores TC-1 y TC-2, para la secuencia de trituración y bombeo y para la velocidad de agitación. Además pone las plantas en modo automático.

Mediante la subrutina *SEGURIDAD*, se evitan daños en la instrumentación. Por ejemplo, si el nivel del baño térmico baja de un umbral determinado, se detiene la bomba de circulación y se pone el lazo TC-1 en manual con la salida a 0, con lo que se apagará la resistencia de calefacción.

Mediante la subrutina *Control ON/OFF,* se realiza un control ON/OFF para el lazo TC-1 de control de temperatura del baño térmico para los valores configurados de referencia, salida máxima y mínima configurados, y la banda muerta

La subrutina *MAPEO* se encarga de mapear todas las variables de módulos de E/S, variables configurables, etc. a memoria del PLC. Además, realiza un cambio de escala para las salidas analógicas a los agitadores y bombas, salidas digitales a relé y entradas analógicas como pH.

**Software de supervisión de las plantas**

La estructura del software (Figura 15) se establece en tres niveles.

En el nivel más bajo se encuentra el software que se ejecuta en el PLC, que como se ha comentado previamente, se encarga de acceder a la instrumentación de campo y de realizar el control a nivel de lazo. Se ha programado en *Ladder* utilizando el entorno de desarrollo de *RSLogix 500* de Rockwell

En el nivel intermedio, el servidor OPC (*OLE for Process Control*) accede a la información que proporciona el PLC y la pone a disposición de los clientes OPC. Como servidor OPC se ha utilizado *RSLinx OPC Server* de Rockwell.

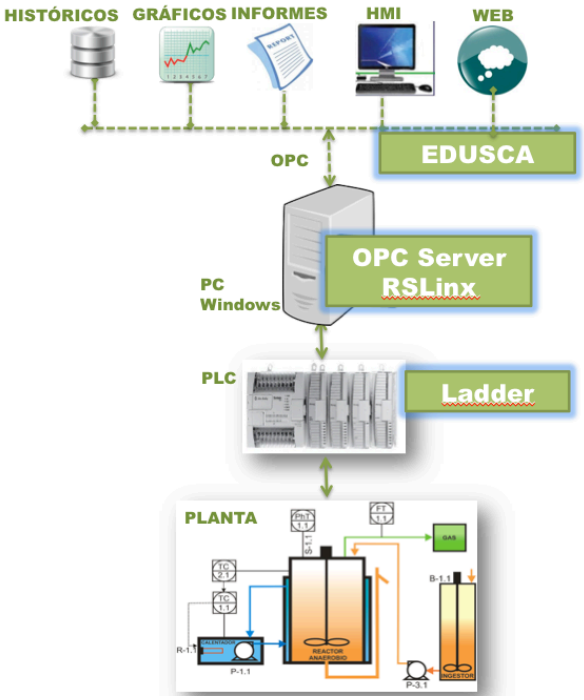



Figura 15.- Estructura del software

En este proyecto, como cliente OPC, se ha utilizado EDUSCA que es un software de desarrollo propio. Dispone de las principales características y funcionalidades, comunes a la mayoría de los sistemas SCADA comerciales, como son:

- Interfaz hombre-máquina configurable basada en sinópticos
- Representación gráfica de datos mediante diagramas de barras, gráficas de tendencias, tablas, etc.
- Sistema de gestión de alarmas con avisos visuales y sonoros.
- Almacenamiento de los datos de manera permanente (históricos) en diversos formatos.
- Controladores PID.

Configuración de EDUSCA

Edusca es altamente y fácilmente configurable, a fin de poder adaptarlo a diferentes tipos de procesos a supervisar. Para adaptarlo a las distintas plantas se dispone de la utilidad *SetupEDUSCA*.

Desde esta utilidad es necesario realizar una configuración global **(**Figura 16**),** donde se selecciona el fichero de configuración de datos a emplear (*Planta.sca.dat*), el sinóptico principal de inicio (*principal.syn*) y el directorio donde se almacenarán los históricos.

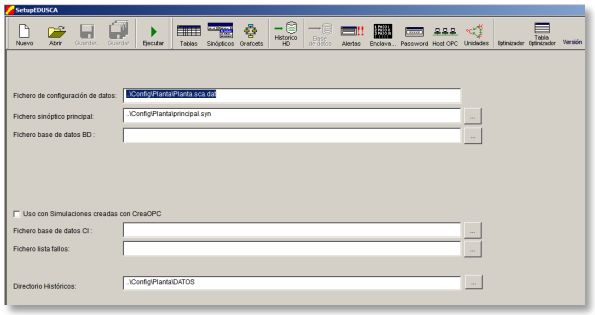



Figura 16.- Pantalla de configuración global

Posteriormente, es necesario configurar los datos (Figura 17). Se trata de definir qué variables se van a adquirir del Servidor OPC *RSLinx*. Dependiendo del "tipo dato" (CONTROLADOR, SUPERVISIÓN Y LECTURAESCRITURA) con que se ha definido cada variable, será necesario configurar unos parámetros asociados.

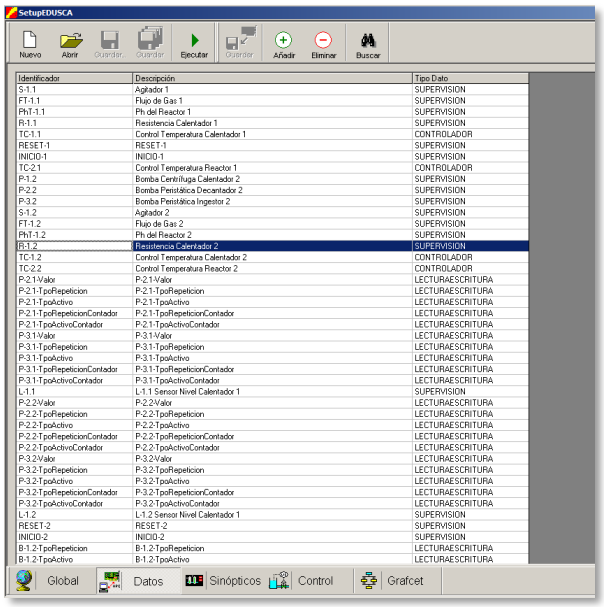



Figura 17.- Pantalla para configuración de datos

En la Figura 18 se muestran los parámetros a configurar para una variable de tipo CONTROLADOR, donde aparece una zona con la fuente de datos OPC.

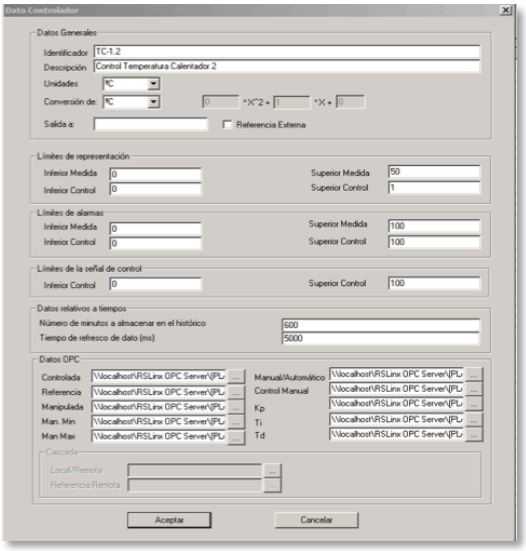



Figura 18.- Pantalla de configuración de un CONTROLADOR

En la Figura 19 se muestran los campos a configurar en una variable de tipo LECTURA y otra de tipo SUPERVISIÓN. En ambos casos, aparece la fuente de datos OPC.
Un parámetro fundamental a configurar para los tres tipos de variables es el tiempo de muestreo. Las variables que se han definido como "SUPERVISIÓN" y "CONTROLADOR" se almacenarán en un histórico, que permitirá obtener gráficas para observar su evolución temporal.

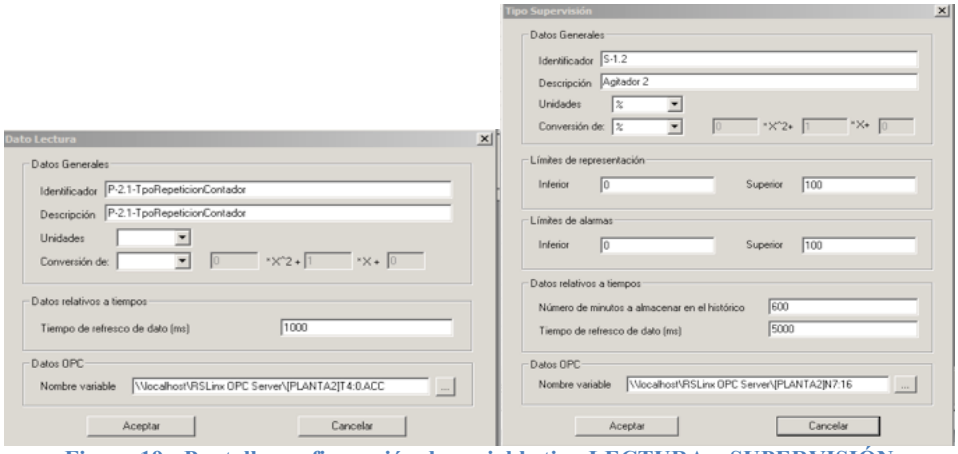



Figura 19.- Pantalla configuración de variable tipo LECTURA y SUPERVISIÓN

Interfaz Hombre-Máquina basado en sinópticos

Además de completar los pasos previos, para la adaptación de Edusca a la planta es necesario configurar el interfaz HMI utilizando sinópticos. En estos sinópticos se encontrarán los componentes y variables representativas del proceso.
En nuestro caso, existirá un sinóptico principal (Figura 20) y un sinóptico para cada planta (Figura 21), que incluyen los equipos (reactor, ingestor, baño térmico) y la información más importante de las dos plantas, según el diseño realizado. Esta información incluye la relativa a los actuadores, sensores, controladores, LEDs para mostrar el estado de los dispositivos, botones que pueden ser pulsados por el operador para realizar una acción determinada.

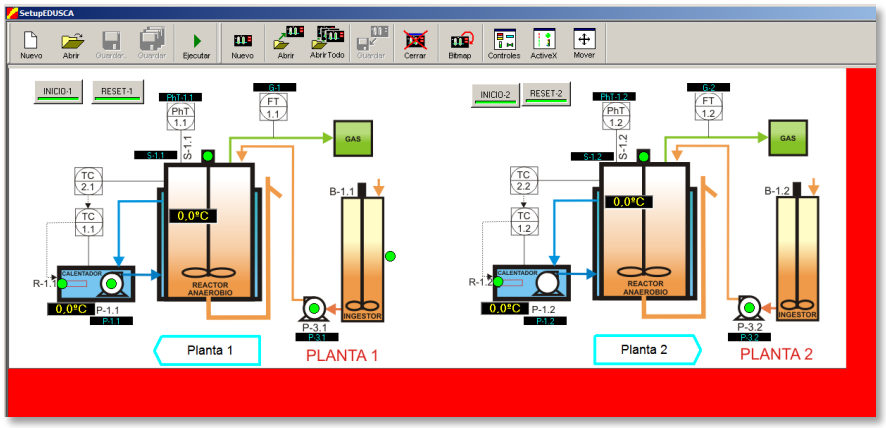



Figura 20.- Pantalla de configuración de sinópticos

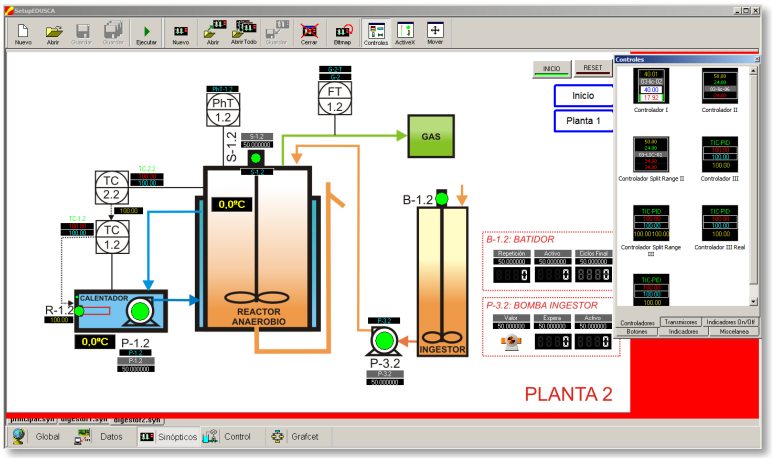



Figura 21.- Pantalla para la configuración de sinópticos

Desde el software de supervisión, el operador podrá resetear la planta, iniciarla, modificar los parámetros de los controladores, ajustar la secuencia del bombeo del ingestor, y manipular la planta de forma manual.

Respecto al almacenamiento de los datos en ficheros históricos en la configuración global del sistema se definirán qué variables se quieren almacenar de forma persistente, mediante la selección del tipo de variable. Este almacenamiento se realizará con el muestreo que se tenga seleccionado en la configuración de la variable.

Funcionamiento del software de monitorización y supervisión

Una vez que se han realizado los pasos de configuración, el operador podrá ejecutar el software para supervisar y monitorizar las plantas. Como se ha comentado, mediante la configuración de los datos se realizará la captura de los mismos vía OPC. El operador podrá navegar entre los sinópticos, monitorizar las distintas variables mediante sus valores numéricos actuales y mediante gráficas, manipular los actuadores, acceder a los históricos, etc., de una forma intuitiva y cómoda.

La navegación entre sinópticos se llevará a cabo mediante una serie de botones (Figura 22), con los que además se podrá iniciar la planta (botón INICIO) con los valores configurados por defecto, llevar a la planta a un estado seguro (botón RESET) para que posteriormente pueda ser arrancada por el operador o apagada de forma segura, etc.

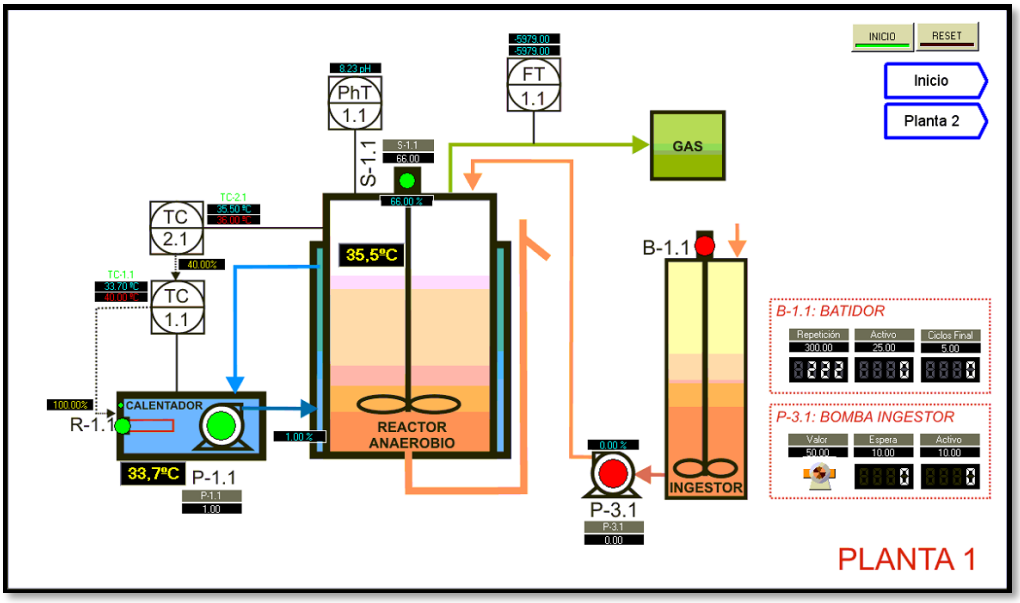



Figura 22.- Sinóptico de la planta 1 en funcionamiento

En la Figura 22 muestra una instantánea de la planta, donde aparece cómo se están monitorizando los sensores, actuadores y controladores. Sus valores actuales se muestran en unos determinados indicadores numéricos, además de LEDs (en verde y rojo) para indicar el estado. El operador podrá pulsar con el ratón sobre cada uno de los indicadores que muestran el valor de los sensores y podrá acceder a las gráficas para observar su evolución temporal (Figura 23). Cuando el operador pulsa sobre un actuador podrá ponerlo en funcionamiento, detenerlo y modificar el valor del mismo, aunque si depende de un lazo de control es necesario conmutar a modo manual. También aparecen los parámetros relacionados con la secuencia de trituración y bombeo en el ingestor y su configuración se podrá modificar en línea.

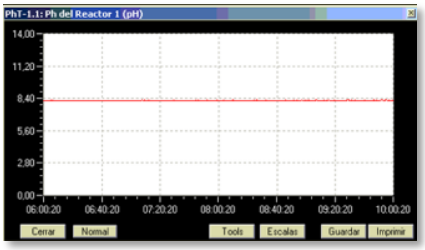



Figura 23.- Evolución temporal del pH en planta 1

La Figura 24 muestra la carátula de un controlador, concretamente del TC-2.1 (Control temperatura del reactor 1). En ella se puede observar una interfaz multimodal basada en barras, en valores numéricos y en gráficas temporales, donde aparecen los valores de la referencia (en rojo), la variable manipulada (en amarillo) y la controlada (en azul). El operador podrá realizar las acciones típicas, como modificar la referencia, modificar los parámetros del controlador, conmutar modo automático y manual para establecer una determinada salida para el actuador, etc.

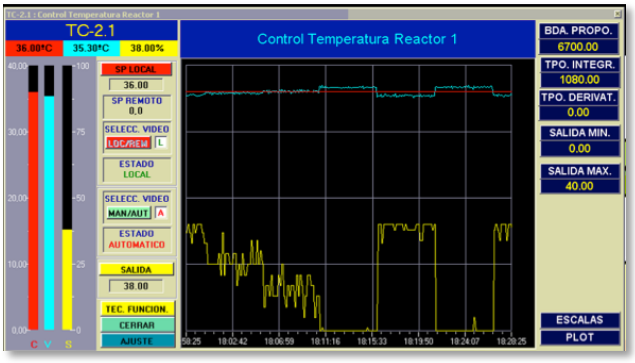



Figura 24.- Carátula del controlador TC-2.1

En la Figura 25 aparece la evolución temporal de las variables asociadas a los controladores de temperatura del reactor y del calentador y la acción en cascada, cómo la salida del controlador del reactor (TC-2.1) se convierte en la referencia del controlador del calentador (TC-1.1).

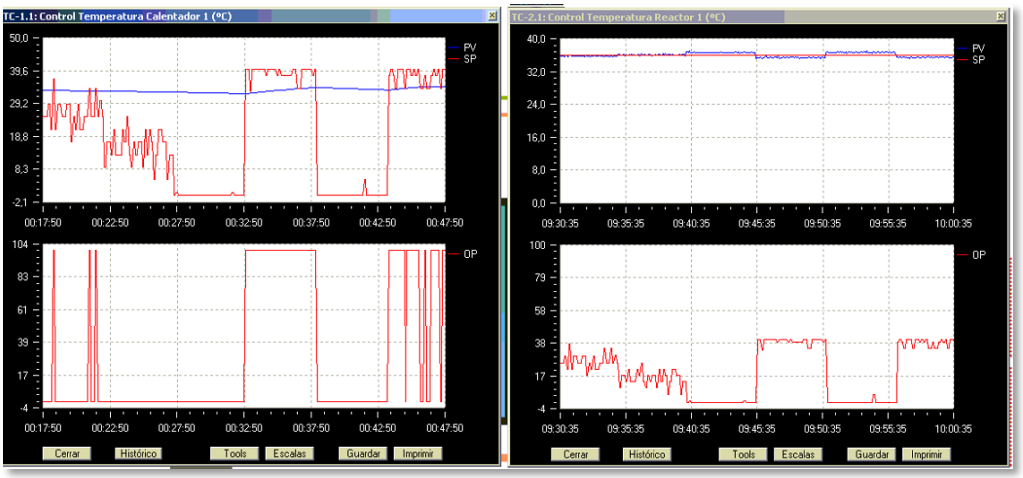



Figura 25.- Gráficas de las variables asociadas a los controladores TC-1.1 y TC-1.2

Por último, la Figura 26 muestra el sinóptico general del SCADA, integrando el esquema de las dos plantas y sus variables más relevantes. En ella se observa que la planta 1 está en funcionamiento y la planta 2 está parada.

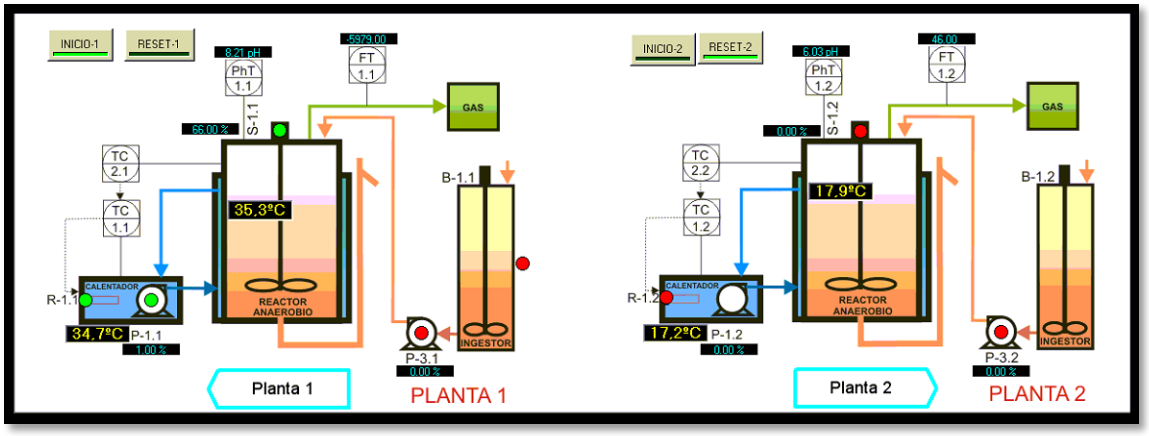



Figura 26.- Sinóptico principal del HMI que muestra la planta 1 en funcionamiento y la planta 2 parada

Además de poder visualizar la evolución temporal de las variables, también se puede acceder a los datos almacenados en ficheros de históricos, que han sido recogidos por el SCADA. Para ello se selecciona el dato a visualizar así como el intervalo temporal (Figura 27).

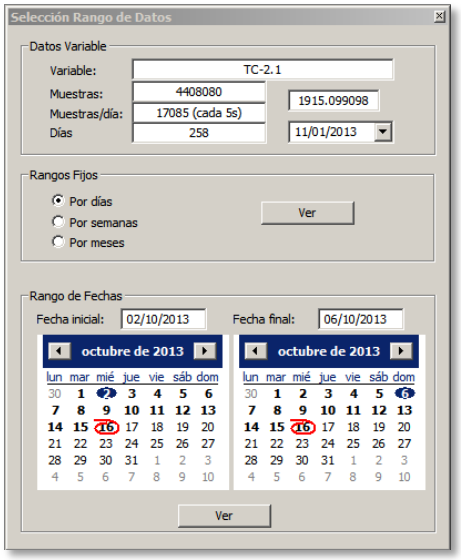



Figura 27.- Diálogo para seleccionar el intervalo de tiempo del histórico

En la Figura 28 se muestran las variables del controlador de la temperatura del reactor (TC-2.1) y del pH de la planta (PhT-1.1) entre los días 02/10/2013 y 06/10/2013.

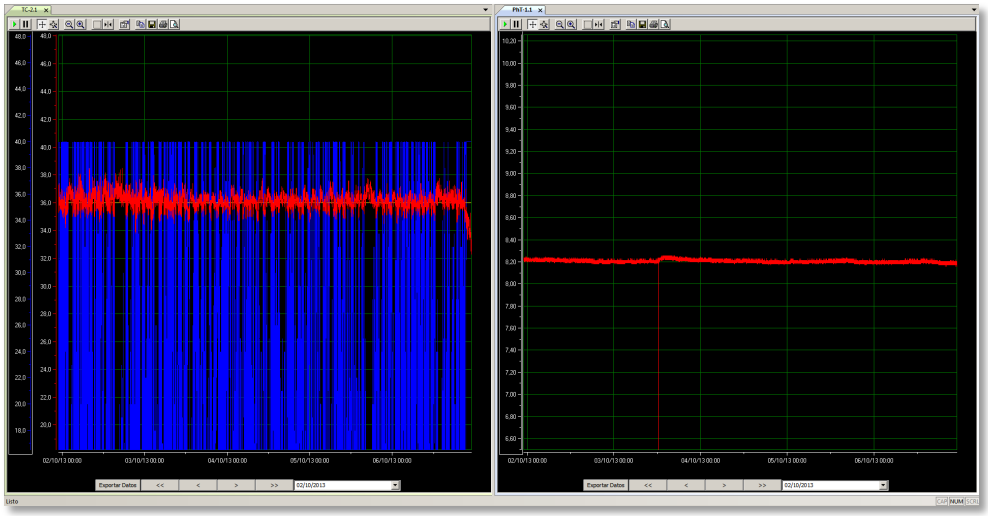


Figura 28.- Evolución temporal de la temperatura del reactor (TC-2.1) en la izquierda y el pH del reactor (pHT-1.1) en la derecha en el intervalo seleccionado

La Figura 29 muestra la activación de la trituradora (B-1.2) y la de la bomba (P-3.2) en ciclos regulares. También, se observa cómo se produce un mayor número de activaciones de la trituradora, para efectuar el batido y evitar sedimentación, que activaciones de la bomba, según configuración que se ha planteado.

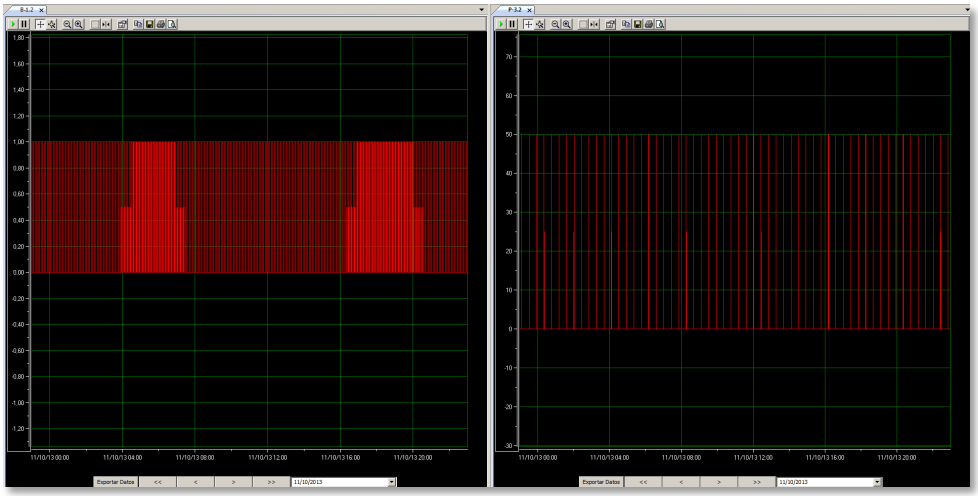


Figura 29.- Gráfica de activación de la trituradora (B-1.2) y la bomba (P-3.2) en un intervalo de tiempo

Como un resultado final, la Figura 30 muestra los valores del contador de gas entre los días 16/04/2013 y 16/05/2013.

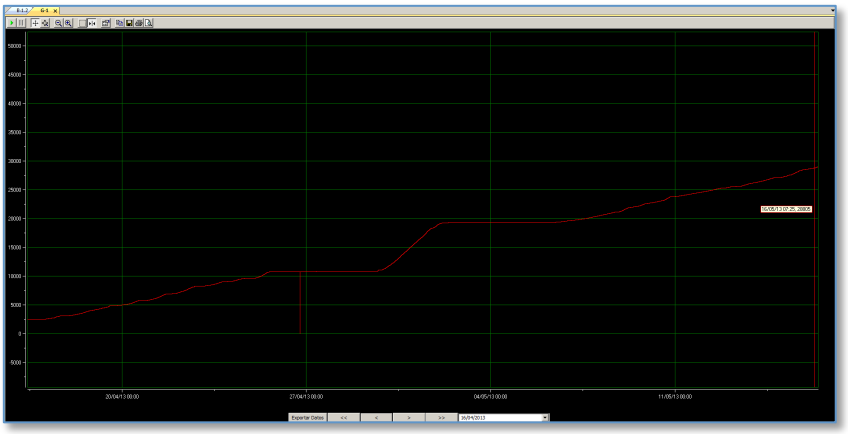


Figura 30.- Gráfica del contador de gas (G-1) en un intervalo de tiempo

## Fase 6. Construcción de instalaciones

BIOGAS PATANEGRA S.L. ha instalado en su finca Valdejudío situada en Castraz (Salamanca) un conjunto modular integrado por dos casetas de obra prefabricadas de 2,45 x 6 metros cada una con aire acondicionado y separadas físicamente. Ambas casetas estás colocadas sobre una solera de hormigón para evitar humedades y aumentar el aislamiento.

La primera caseta sirve como sala de control y dispone del siguiente material:

- Ordenador para realizar tareas de monitorización y supervisión.
- Mobiliario de oficina
- Lavabo independiente
- Equipo de refrigeración

El ordenador dispone de conexión a Internet lo que permite realizar tareas de monitorización y supervisión desde otros terminales remotos, con las ventajas que esto supone en cuanto a reducción de desplazamientos del personal a la planta, reducción del tiempo de respuesta ante un incidente, aumento de la seguridad, etc.

Figura 31.- Sala de control

La segunda caseta se encuentra comunicada con la primera por una puerta y contiene:

- Dos plantas piloto descritas previamente
- Equipos de laboratorio
- Equipo de aire acondicionado y bomba de calor.

Se han construido dos plantas piloto para facilitar la realización de ensayos AD

**Equipos de análisis de laboratorio**

Con el fin realizar los ensayos necesarios para poder caracterizar y determinar el potencial metanogénico de las muestras utilizadas así como establecer las mejores condiciones de operación de un digestor, se ha montado un laboratorio con el siguiente equipamiento:

- Analizador de biogás
- Sonda de pH fija
- Medidor portátil de pH marca Hanna
- Horno marca Tecnopiro para la determinación de los sólidos
- Conductímetro portátil de Labbox
- Báscula digital de Digital Scale.

**Analizador de biogás**

Analizador de biogás automático GA 3000 PLUS (Figura 32) con las siguientes características:

- Dos puntos de muestreo
- Medición de los siguientes gases:
  CH4 (Metano), CO2 (Dióxido de carbono),O2 (Oxígeno) y H2S (hasta 5.000 ppm)

- Monitorización continua con pantalla retroiluminada
- Incluye salidas analógicas 4-20 mA para pasar la señal a PLC para cada gas
- Acondicionamiento de la muestra (filtros antipartículas y decantación de humedad).
- Comunicación Modbus
- Caja de acero inoxidable

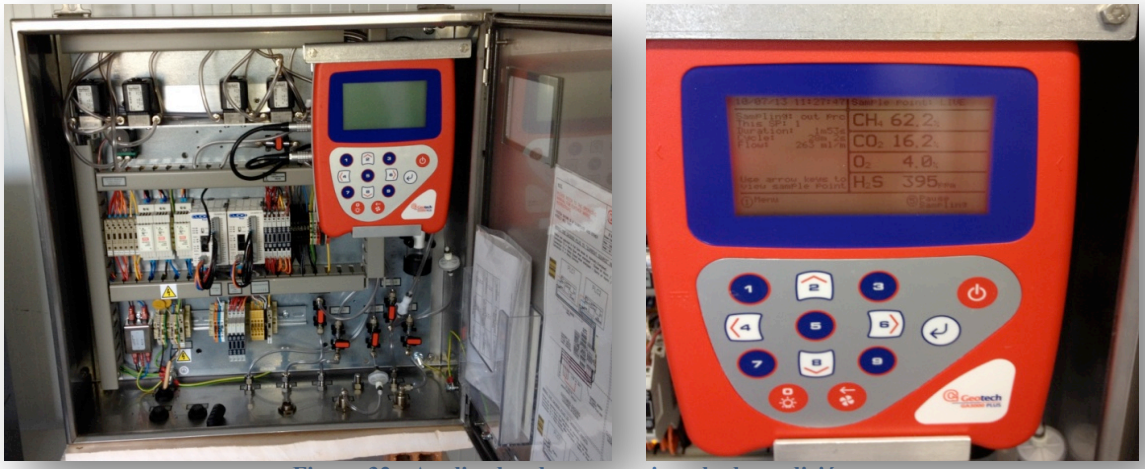



Figura 32.- Analizador de gases y ejemplo de medición

**Sonda de pH fija**

Sonda de pH/ Redox Chemitec 4238-38 con las siguientes características:

- Rango de medición de pH 0 a 14 ± 0.01pH y ±1500mV redox
- Compensación automática de temperatura de 0 a 50ºC ±0.1ºC
- Calibración manual en dos puntos
- Electrodo fijo de cristal

Figura 33.- Mediciones y sonda de pH

**Medidor de pH portátil**

Medidor de pH y temperatura portátil de alta precisión fabricado por Hanna Instruments modelo 410-0946 con las siguientes características:

- LCD de dos niveles (lecturas de pH y temperatura)
- Calibración automática en 1 punto
- Dimensiones 163x40x26 mm, 85 g de peso

Figura 34.- Medidor de pH portátil y medición

**Horno y equipos de horno**

HORNO Lab-2 con programador PR-9T fabricado por Tecno-piro cuyas características son:

- Capacidad: 2.6L
- Medidas interiores: 150 ancho X 160 fondo X 110 alto
- Potencia: 2 kW
- Temperatura máxima: 1150ºC
- Cuadro de control: incluye microprocesador Tecno-piro PR-9T digital de nueve programas en memoria de nueve segmentos cada uno, y puesta en marcha retardada.
- Incluye 6 crisoles de porcelana y pinzas de manejo

Figura 35.- Horno y crisoles de porcelana

**Báscula**

Báscula de precisión de 0,1 gramos con sistema de tarado y calibración incluyendo funda.

Figura 36.- Báscula de precisión

**Analizador de nitrógeno**

Analizador de nitrógeno por estimación por conductímetro específico, fabricado por Milwaukee.

- Rango: 0 a 1990 µS/cm
- Resolución: 10 µS/cm
- Precisión: ±2% a fondo de escala
- Calibración manual en un punto
- Compensación automática de temperatura de +5 a +50 ºC
- Electrodo fijo

Figura 37.- Analizador de nitrógeno

## Fase 7.- Puesta en marcha y calibración de equipos

En este apartado se va a describir cómo se ha llevado a cabo la puesta en marcha de la planta piloto, comentando las principales pruebas realizadas para comprobar el correcto funcionamiento de cada equipo de la planta y su calibración.

**Cuadro de control**

Se instaló el armario eléctrico que incluye el PLC y los variadores de frecuencia. Se realizaron todas las conexiones que se detallan en la Tabla 3 y Tabla 4 para conectar todos los sensores y actuadores al PLC. Se instaló en PC con el software de monitorización y supervisión, y se comprobó a través de él correcto funcionamiento de la planta en manual. Posteriormente, se procedió a la sintonización de los lazos de control a través de experiencias en lazo abierto, utilizando software de diseño de controladores.

**Baño térmico**

Se puso en marcha el sistema de calefacción y bombas de circulación. Se comprobó su correcto funcionamiento y la no existencia de fugas de agua.

Se comprobó el funcionamiento del calentador de cartucho y de la válvula de nivel.

Comprobamos la temperatura alcanzada en el agua contenida en el depósito mediante un termómetro visual para garantizar la correcta lectura de datos por parte de los sensores de la planta y el PLC.

Una vez puesto en marcha se observaron pérdidas de calor en el depósito de agua por lo que se procedió a colocar un aislante térmico en el fondo y laterales del mismo, y a la fabricación de una tapadera para evitar pérdidas de agua por evaporación.

**Equipo de alimentación**

Primero se rellenó con agua el contenedor y se conectaron las bombas de alimentación para poder determinar el caudal de agua aportado en un periodo de tiempo. Este proceso se repite con purín y con la mezcla de purín y estiércol para calibrar el caudal de bombeo en un periodo de tiempo y a diferentes velocidades.

Al utilizar como sustrato purín comprobamos que la sección de los tubos era insuficiente para esta materia. Por tanto, nos vimos obligados a cambiar la sección del tubo, lo que implica el cambio de cabezales de las bombas peristálticas no preparadas para este diámetro de trabajo.

Partiendo de la base de que el TRH es de 25 días, la alimentación debe ser 600 mL diarios, que se repartirán en 48 periodos de alimentación de 10 s cada uno.

Se deja funcionando el equipo y al cabo de unas horas se atasca el tubo de salida del depósito de alimentación debido a la sedimentación del sustrato (purín). Por ello se decide comprar unos equipos de trituración para homogeneizar la mezcla y evitar este problema.

Durante este periodo se hace necesario alimentar de forma manual varias veces al día.

Una vez instalados los trituradores, se programan para que arranquen cada 300s y así evitar sedimentaciones. Por tanto, el equipo triturador arrancan 288 veces al día durante 25s.

**Digestores**

Inicialmente, se parte de un digestor conectado a un decantador (Figura 38) por vasos comunicantes. El decantador se utiliza para expulsar el rebosante y mantener el flujo de las bacterias.

Figura 38.- Digestor inicial y decantador

Se rellenan de agua y se calibra la altura para establecer el nivel del rebosadero del decantador. Cuando se rellena de agua no se observa ningún problema. Sin embargo, al rellenar con purín se producen problemas de sedimentación que obstruyen la comunicación entre digestor y decantador e impide la expulsión del digerido, por lo que el nivel del digestor sube demasiado, el gas generado no tiene espacio y el líquido pasa a los tubos de salida de gas.

Para resolver el problema consultamos a un tecnólogo que nos sugiere varias soluciones.

- Eliminar los decantadores
- Ampliar la sección de tubería de salida
- Diseñar un sistema de evacuación tipo sifón que implica la colocación de un grifo de apertura en la parte inferior del digestor para solucionar posibles atascos.
- Nos recomienda una modificación en el sistema de agitación para mejorar la homogeneidad del sustrato.

Finalmente, se decide eliminar el decantador. En el digestor definitivo (Figura 39) se incluye un grifo de salida inferior para la toma de muestras y la realización de purgas.

Figura 39.- Digestor modificado con grifo de salida inferior

Se rellenan los digestores con agua y purín se comprueba el funcionamiento del equipo de agitación y sensores.

**Sondas de pH y temperatura**

Se comprueba su correcto funcionamiento usando un medidor de pH portátil, y se detectan pequeñas diferencias, por lo que se hace necesario el recalibrado de las sondas con tres soluciones tampón de 4, 7 y 10 de pH.

**Caudalímetro**

Se conectan los caudalímetros con la tubería de líquido correspondiente.

Se realizan ensayos con unas jeringuillas de 60 y 10 mL para determinar el nº de pulsos registrados por el caudalímetro y así conocer los mL por pulso contabilizado. Se comprueba la correcta recepción y lectura por el PLC y PC.

**Ensayos de pérdida**

Se introduce presión con aire externo para comprobar la no existencia de fugas. Se utiliza una columna de agua en un tubo externo para comprobar en un período de 0.5 horas la no pérdida de aire por parte de todo el circuito.

Se detectan pérdidas en las juntas del digestor que tienen que ser selladas.

**Analizador de biogás**

Se puso en marcha el analizador de biogás y se comprueban los certificados de calibración.

Se realizan dos ensayos, uno con aire externo y limpio y el segundo con una mezcla de gas conocida y certificada por AIRLIQUIDE para asegurar el correcto funcionamiento de todos los parámetros utilizados.

**Equipos de laboratorio**

Se prueban todos los equipos: horno, báscula, medidor de pH portátil, etc.

Cabe destacar que después del primer ensayo con el horno fue necesaria la colocación de una chimenea para la extracción de los gases.

## Fase 8.- Puesta en marcha de la biología anaeróbica

Tras la consulta de las fuentes bibliográficas, y como hemos comentado previamente, ***las puestas en marcha de los reactores son, en general, lentas, requiriendo tiempos que pueden ser del orden de meses.***

Para la puesta en marcha de la biología se procedió al llenado de los digestores con material procedente de dos plantas de biogás diferentes mezclados al 50%.

Se inicia un periodo de adaptación en el que se comprueba diariamente la temperatura y el pH de la mezcla. Para ello se utiliza un medidor de pH externo para contrastar las posibles diferencias con la sonda de pH conectada, que es calibrada periódicamente.

Una vez estabilizado el sistema biológico a un pH cercano en ambos casos a 8.10 y una temperatura de 37$^{\circ}$C, se inicia la carga del digestor con los purines procedentes de madres gestantes con lechones.

Una vez comprobados todos los equipos y estabilizado el sistema biológico ,se pueden comenzar los ensayos.

## Fase 9.- Ensayos realizados

En este apartado se detallan los ensayos realizados para poder caracterizar y determinar el potencial metanogénico de las muestras utilizadas así como establecer las mejores condiciones de operación de un

digestor anaerobio en condiciones mesófilas que maximicen la producción de biogás. Con ello se exponen los resultados más significativos de este proyecto.

**Ensayos**

Es necesario el control de ciertas condiciones (Parámetros operacionales) que deben mantenerse o asegurarse para el desarrollo de los ensayos.

- pH, en rangos desde 7.0 a 8.4 que se supervisan gracias a las sondas y a la aplicación de monitorización.
- Nutrientes, con valores que aseguren el crecimiento de los microorganismos.
- Tóxicos e inhibidores, cuya concentración ha de ser mínima.
- Temperatura: en estos ensayos se trabaja con temperaturas en torno a 37 ºC, es decir dentro, de un rango mesofílico. La temperatura se mantiene en ese valor gracias al control en cascada mediante las sondas y el baño térmico.
- Agitación: Es necesario transferir al sistema suficiente energía para que el substrato sea transferido a cada población o agregados de bacterias, así como mantener homogénea la mezcla que permitirá tener concentraciones bajas de inhibidores y evitar sedimentaciones. Esto estaría conseguido con el sistema de agitación con dos hélices-palas que giran constantemente.
- Tiempo de retención hidráulica (T.R.H): Es el cociente entre el volumen total de digestor y el caudal de alimentación. Es el tiempo medio de permanencia del sustrato en el reactor. Para nuestro caso se alimenta 600 mL diarios para un volumen de digestor de 15L supone un TRH de 25 días.
- Velocidad de carga orgánica: Es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo. Es necesario encontrar un valor óptimo para cada residuo a tratar. En este caso se determina tras el estudio de sólidos totales y volátiles de cada una de las muestras.

**Métodos**

Para la determinación de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) se realiza mediante el método normalizado 2540E de "*Standard methods for examination of water and wastewater*" (APHA,1995).

Los ST se determinaron mediante el peso de residuo seco, secado a 105ºC en horno lab. lpb- 2 "k" con programador (Figura 40), durante 48 horas, referido al peso de materia fresca inicial. Para el cálculo se utiliza la siguiente expresión:

$$ST\% = \frac{peso\,105ºC - tara}{peso\ muestra} * 100$$

La determinación de los sólidos volátiles (SV) se realizan sobre la misma muestra, mediante calcinación, en el horno a 550ºC durante 6 horas. El contenido en sólidos volátiles se determina por diferencia entre el residuo seco y las cenizas, según la expresión:

$$SV\% = \frac{peso\,105ºC - peso\,550ºC}{peso\ muestra} * 100$$

Figura 40.- Proceso de secado y pesado de la muestra

**Muestras**

Las muestras son aportadas por la empresa Explotación Ganadera El Harem. Se trata de muestras de purín procedentes de madres con lechones, y muestras de estiércol de madres gestantes. Se trata de hembras de peso 148+/- 20.5 kg alimentadas con pienso de estas características: proteínas 12.28%, grasa 2.5% y 7.00% de fibra.

Las muestras se toman directamente de la salida de los desagües conectados a parideras. Se abre el foso se deja salir la muestra durante unos segundos y se recoge en cubetas calibradas de 5 L. Se trasladan a la caseta de la planta piloto donde se homogenizan para cargarse al depósito.

En el caso del estiércol se recoge con una pequeña pala y se depositan en un contendor. Se trasladan a la caseta donde se pesan para preparar la mezcla adecuada con purín (Figura 41).

Figura 41.- Muestra de purín y muestra de estiércol

**Plan de trabajo para los ensayos**

Se ha diseñado el siguiente plan de trabajo para los ensayos:

- Carga del digestor con material digerido de otras plantas de biogás y estabilización del sistema a 37$^0$C de temperatura y 8.10 de pH.
- Inicio de la alimentación con mezcla compuesta por 80% de purines y 20% de estiércol, previa caracterización de sólidos totales y sólidos volátiles de los componentes.
- Comprobación de la generación diaria de gas.
- Inicio de carga de parte de los residuos a analizar de forma progresiva, se comienza con una carga orgánica de 0.3g de sólidos volátiles por litro de digestor y día.
- Estabilización del proceso hasta recuperar niveles de pH
- Incrementos progresivos de 0.20 g de sólidos volátiles por litro de digestor y día siempre comprobando que el pH se mantiene en niveles superiores a 7.3 y que no se producen retrocesos de pH con respecto a la medida de carga anterior.
- Llevar al digestor a cargas de 3.0 g de sólidos volátiles siempre que sea posible y anotando cualquier variación significativa en la generación de gas.
- Comprobación de datos.

**Caracterización y generación de gas procedente de purines de cerdo ibérico de madres con lechones**

Se prepara una muestra homogénea y caracterizada de purines procedentes de cerdas de gestación con lechones.

Se analiza la muestra obteniéndose los resultados que aparecen en la Tabla 5.

Tabla 5.- Caracterización inicial de la muestra de purines

| Muestra | Sólidos totales(ST) | Sólidos volátiles(SV) | Temperatura | pH |
|---|---|---|---|---|
| **purines** | 4.65% | 67% | 37$^0$C | 7.1 |

El digestor es alimentado con 600 mL diarios de purín lo que corresponde a una carga orgánica de 1.25 g de sólidos volátiles por L de digestor y a un tiempo de retención hidráulica de 25 días.

Una vez estabilizado el proceso durante una semana hasta obtener datos equivalentes estadísticamente entre los días ,se realizan los cálculos necesarios y se determina lo siguiente:

> *Los purines porcinos de maternidad procedentes de la granja Explotación Ganadera El Harem S.L. tienen una generación de* ***355*** *$m^3$ de biogás por T de sólido volátil.*

Uno de los digestores se mantiene con esta mezcla durante 60 días para determinar el producto obtenido, analizándose y obteniéndose los resultados de la Tabla 6

**Tabla 6.- Caracterización de una muestra de la mezcla a los 60 días**

| Muestra | Sólidos totales(ST) | Sólidos volátiles(SV) | Temperatura | pH |
|---|---|---|---|---|
| **purines** | 3.60% | 45% | $37^0$C | 8.1 |

El volumen de gas producido se determina diariamente gracias al registro de los contadores. En la Figura 42 se muestra la evolución de la producción de biogás en un periodo de 25 días.

La composición del gas obtenido es determinada en el analizador de gas.

*Los datos del análisis del gas producido fueron de media un % de metano ($CH_4$) del 63.1 %.*

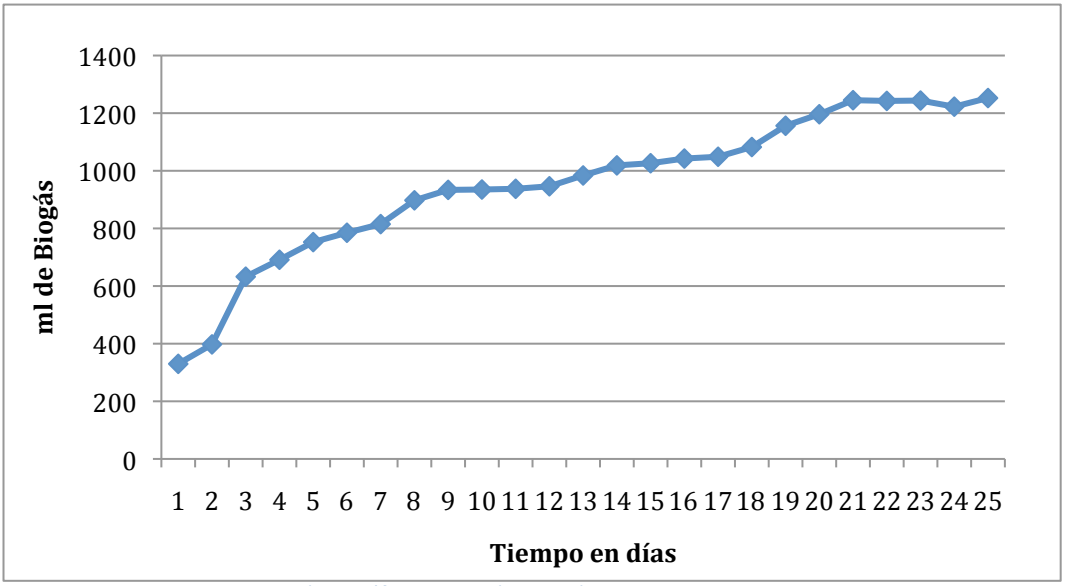



**Figura 42.- Producción de biogás para el purín**

**Caracterización y generación de gas a partir de estiércol de cerdo ibérico**

Se prepara una muestra homogénea y caracterizada de purines procedentes de cerdas de gestación con lechones y de estiércol de cerdo.

Se analizan los siguientes parámetros que aparecen en la Tabla 7.

Tabla 7.- Caracterización de las dos muestras

| Muestra | Sólidos totales(ST) | Sólidos volátiles(SV) | Temperatura | pH |
|---|---|---|---|---|
| **purines** | 4.68% | 67% | $37^0$C | 7.1 |
| **estiércol** | 27% | 72% | $37^0$C | 6.7 |

Tras estudiar las cargas orgánicas del digestor se decidió realizar una mezcla compuesta por 400 ml diarios de purín y 200 ml de estiércol, lo que corresponde a una carga orgánica de 3.4 g de sólidos volátiles por litro de digestor y a un tiempo de retención hidráulica de 25 días.

El proceso se estabiliza durante una semana hasta obtener datos equivalentes estadísticamente entre los días .

Tras realizar los cálculos oportunos se llega a la conclusión de que:

> *El estiércol tiene una generación de gas equivalente de **342**$m^3$ de biogás por tonelada de sólido volátil.*
>
> *Los análisis del gas generado aportan un 59.1% de metano a partir de estiércol y el pH del proceso fue de 7.8.*
>
> *Respecto a esta carga no se observan diferencias de generación por la elevada carga orgánica con respecto a cargas de biomasa inferiores.*

En la gráfica de la Figura 43 se puede observar el comportamiento de la mezcla purín-estiércol, en la producción de biogás.

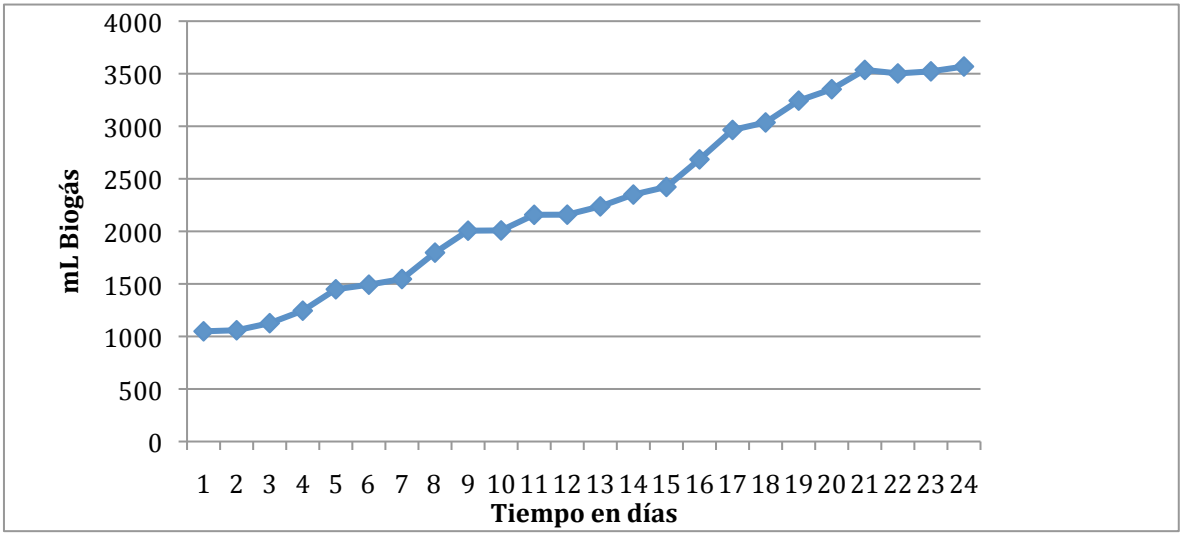



Figura 43.- Producción de biogás para el purín-estiércol

**Ensayo actual**

En estos momentos se está realizando un ensayo para caracterizar una mezcla tipo en un digestor real de un 70% de purín de la granja, un 30% de estiércol y la máxima cantidad admisible de un lodo procedente de depuradora de matadero de ibérico.

Se pretende estudiar la carga orgánica máxima admisible de la mezcla así como posibles inhibiciones debidas al exceso de nitrógeno y/o ácidos grasos volátiles.

## Resumen resultados.

Los principales resultados obtenidos son:

a) Se ha diseñado y construido una planta piloto a escala que permite reproducir el proceso de una planta real, como un primer paso para la realización de experimentos y su validación.

b) Se ha diseñado el software para disponer de un sistema SCADA que permite la monitorización y supervisión de la planta mediante una interfaz HMI intuitiva y cómoda. Además permite guardar históricos de las plantas, lo que permitirá analizar la evolución de las variables fundamentales.

Debido al diseño, el SCADA puede ejecutarse desde un ordenador remoto situado otras instalaciones de la empresa situadas a decenas de kilómetros, con las ventajas que esto supone en cuanto a reducción de desplazamientos del personal a la planta, reducción del tiempo de respuesta ante un incidente, aumento de la seguridad, etc.

c) Se ha diseñado un plan para la puesta en marcha de la planta piloto, que ha consistido en las siguientes fases, y que han sido llevadas a cabo:

- Puesta en marcha y calibración de los equipos
- Puesta en marcha de la biología anaeróbica.
- Comprobación del correcto funcionamiento para el inicio de los ensayos.

d) Se han realizado los siguientes ensayos:

- Caracterización y generación de biogás procedente de purines de la granja Explotación Ganadera El Harem.
- Caracterización y generación de biogás procedente de estiércol de la granja Explotación Ganadera El Harem.
- Caracterización y generación de biogás de la mezcla de estiércol y purín con otros residuos industriales.
- Determinación de las condiciones óptimas de operación de un digestor anaeróbico en rango mesófilo (velocidad de carga orgánica (VCO) y tiempo de retención hidráulica (TRH)) que maximicen la producción de biogás y mantenga el sistema en condiciones estables .

## BIBLIOGRAFIA


Cairó, J.J. y París, J.M. (1988). "*Microbiología de la digestión anaerobia, metanogénesis*". Actas del 4th seminario de tratamiento anaerobio de aguas residuales. Valladolid, pag. 41-51.

Flotats, X., Campos, E. y Bonmatí, A. (1997). "*Aprovechamiento energético de residuos ganaderos*". Seminario Aprofitament energètic de residus organànics. Lleida.

Flotats, X.; Palatsi, J. (2003) Tecnologías de tratamiento de purines de cerdo. "Nuestra Cabaña", núm. 323, p. 48-57.

Gómez, X., Cuetos, M.J., García, A.I., Morán, A. (2005). "*Evaluation of digestate stability from anaerobic processes by thermogravimetric analysis"*. Thermochim. Acta 426,179-184.

IDAE, BESEL (2007)."*Biomasa: Digestores anaerobios*", Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. ISBN-13: 978-84-96680-21-0

Mata-Álvarez, J. Macé, S. y LLABRÉS, P. (2000). "*Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives"*. Bioresource Technology 74, pp. 3-16.

Mata-Álvarez, J. (ed.) (2002). "*Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes"*. IWA Publishing.

Pavlostathis, S.G. y Giraldo-Gómez, E. (1991). "*Kinetics of anaerobic treatment: a critical review*". Critical reviews in environmental control. Vol. 21 (5,6), pag. 411-490

Sawayama, S., Tada, C., Tsukahara, K. y Yagishita, T. (2004). "*Effect of ammonium addition on methanogenic community in a fluidized bed anaerobic digestion"*. J. Biosci. Bioeng. 97, pp. 65–70

Van Lier, J.B., Tilche, A., Ahring, B.K., Macarie, H., Moletta, R., Dohanyos, M., Hulshoff Pol, L.W., Lens, P. y Verstraete, W. (2001). "*New perspectives in anaerobic digestion".* Water Science & Technology, Vol 43, No 1, pp 1–18.

Whittmann, C., Zeng, A.P. y Deckwer, W.D. (1995). "*Growth inhibition by ammonia and use of pH-controlled feeding strategy for the effective cultivation of Mycobacterium chlorophenolicum"*. Appl. Microbiol. Biotechnol. 44 , pp. 519–525.