

# **Diseño y construcción de un prototipo escala semi-industrial para la evaluación del tratamiento de efluentes mediante la tecnología de digestión anaeróbica**

Mieres, Franco\*, Dido, Claudia, Campaña, Horacio<sup>1</sup>

*Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Trenque Lauquen.  
Racedo 298, Trenque Lauquen, Buenos Aires. C.P. 6400. fmieres@frtl.utn.edu.ar*

*(1) Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca.  
11 de Abril 461, Bahía Blanca, Buenos Aires. C.P. B8000LMI*

## **RESUMEN.**

La digestión anaeróbica es el proceso biológico de degradación de la materia orgánica en un ambiente sin oxígeno. Dicho proceso requiere determinadas condiciones estructurales, ambientales y físico-químicas para desarrollarse de forma óptima. La utilización de prototipos de diversas escalas, que contemplen las condiciones límites de cada variable, permite comprender y/o modelizar los comportamientos del proceso, y extrapolar los conocimientos al diseño de reactores a escala industrial. Se presenta el diseño y construcción de un prototipo anaeróbico de régimen semi-continuo a escala piloto, para evaluar el proceso de digestión anaeróbica aplicado al tratamiento de efluentes. El trabajo contempla la sinergia de los diferentes sistemas que lo componen: sistema estructural de estanqueidad; sistema de alimentación y extracción de lodos; control de variables físico-químicas del proceso; agitación y mezclado; sistema de equilibrio térmico; almacenamiento, transporte y utilización de biogás; electricidad, electrónica y automatización; control y adquisición de datos; y sistema de seguridad. La capacidad del reactor es de 20 lts., siendo 17 lts. el volumen efectivo, calefaccionado con una resistencia de 1000 vatios, y agitado mediante un sistema que permite variar los ángulos de incidencia de la hélice y la velocidad de giro. El almacenamiento de biogás se realiza mediante una campana invertida contrapesada, con entradas y salidas hacia trampas anti-retorno y arrestallama; y el control y adquisición de datos se realiza mediante un relé programable conectado a una red ethernet. Las pruebas de puesta a punto del reactor comprendieron un análisis de calibración de temperatura y un ensayo de estanqueidad del mismo, además se realizó un análisis de homogeneidad térmica como variable de respuesta a la agitación. El prototipo construido presenta las condiciones óptimas para la evaluación del comportamiento de la digestión anaeróbica en diferentes condiciones térmicas para una diversidad de sustratos.

**Palabras Claves:** Digestión anaeróbica, Biogás, Efluentes, Biofertilizante, Reactor.

## **ABSTRACT**

Anaerobic digestion is the biological degradation of organic matter in an oxygen-free environment. This process requires certain structural, environmental and physical-chemical conditions develop optimally. The use of prototypes of various scales that consider the boundary conditions of each variable, for understanding and / or model the behavior of the process, and extrapolate the knowledge to design industrial-scale reactors. The design and construction of a prototype anaerobic semi-continuous pilot scale system is presented to evaluate the anaerobic digestion process applied to wastewater treatment. The work involves the synergy of the different systems together: structural sealing system; feed system and sludge removal; physicochemical control process variables; stirring and mixing; thermal equilibrium system; storage, transport and use of biogas; electricity, electronics and automation; control and data acquisition; and security system. Reactor capacity is 20 liters. With 17 lts. The effective volume, heated with a resistance of 1000 watts, and agitated by a system which allows varying the angle of incidence of the propeller and

the rotation speed. The biogas storage is via a counterbalanced inverted bell, with inputs and outputs to backflow arrester and traps; and control and data acquisition is performed by a programmable relay connected to an ethernet network. The test set-up included an analysis of the reactor temperature calibration and leak-proof test, plus an analysis of thermal homogeneity was conducted as variable response to agitation. The built prototype presents optimal conditions for the performance assessment of anaerobic digestion in different thermal conditions for a variety of substrates.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La digestión anaeróbica es un proceso biológico de fermentación microbiana que degrada la materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo dos efluentes, uno semilíquido y otro gaseoso, denominados biofertilizante y biogás. Entre las características principales de esta tecnología se encuentran la baja producción de lodos, alta eficiencia de tratamiento, mayor estabilización del digerido que un sistema aeróbico, generación de biofertilizante y biogás que pueden ser valorizados económicamente.

La degradación del residuo se lleva a cabo mediante el accionar de un grupo de bacterias en tres etapas diferentes. En la primer etapa, denominada "Hidrólisis", los compuestos complejos como las proteínas, carbohidratos y lípidos se hidrolizan en compuestos solubles más simples como aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga. En la segunda etapa, llamada "Acidogénesis", los compuestos solubles son transformados en ácidos orgánicos volátiles de cadena corta y alcoholes. En la última etapa, "Metanogénesis", los microorganismos metanogénicos, de ahí el nombre de la etapa, descomponen el sustrato de la fase anterior en metano y dióxido de carbono.

Para que el desempeño de los microorganismos sea el óptimo en las tres etapas, se requieren determinadas condiciones estructurales, ambientales y físico-químicas. Dichas variables, como también su comportamiento, pueden ser modelizadas mediante la utilización de prototipos de diversas escalas, que contemplen las condiciones límites.

Pr.E.Di.An. 1 es el primer diseño de un "Prototipo para la Evaluación de la Digestión Anaeróbica", en el cual se consideró la sinergia de los diferentes sistemas que interactúan con las variables críticas del proceso. Estos sistemas están compuestos por el sistema estructural de estanqueidad, sistema de alimentación y extracción de lodos, sistema de equilibrio térmico, agitación y mezclado del sustrato, transporte, almacenamiento, y utilización de biogás, control de variables físico-químicas del proceso, electricidad, electrónica y automatización, control y adquisición de datos, y el sistema de seguridad.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivos generales**

- Diseñar y construir un prototipo para la evaluación de la digestión anaeróbica aplicada a distintos efluentes.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Diseñar un prototipo que permita el funcionamiento de un proceso batch como uno semi-continuo.
- Realizar el diseño de un prototipo de bajo costo, que permita ajustar y controlar los parámetros significativos de la tecnología anaeróbica.

## **3. METODOLOGÍA**

La metodología de diseño de Pr.E.Di.An. 1 se conformó mediante el análisis y estudio de cada una de las variables pertinentes a cada sistema, en combinación con las de la digestión anaeróbica. Luego se procedió al diseño en un software 3D de tecnología CAD-CAM (Solidworks) con el objetivo de generar las dimensiones y forma de ensamble de los componentes. Por último se procedió a la construcción del prototipo y los ensayos necesarios para su funcionamiento.

### **3.1. Sistema estructural de estanqueidad**

El sistema estructural de estanqueidad tiene como objetivo contener el residuo a ensayar, mantener la anaerobiosis del sistema y servir de estructura a todos los sistemas que deban conectarse para controlar una variable del proceso. El diseño se basó en un proceso anaeróbico de mezcla completa, ya que esta optimiza las velocidades de digestión de los microorganismos, además de posibilitar el acople de dos reactores y utilizar un proceso de dos fases. Los criterios que se tuvieron en cuenta para el diseño son: escala, rango temperatura, volumen, carga orgánica volumétrica, tiempo de retención hidráulica (TRH), y materia seca (MS) y materia volátil (MV).

#### **3.1.1. Escala**

La escala es 10 veces mayor a los reactores de 2lts construidos en laboratorios con kitsatos y/o Erlermeyers. Por lo tanto el volumen total del reactor es de 20 Lts.

#### **3.1.2. Temperatura**

El reactor está calefaccionado por una resistencia interna de 1000 W, controlado por una sonda de PT100 y un relé programable. Este sistema permite adecuar la temperatura a los tres rangos de trabajo de la digestión, Psicrófila (debajo de 25°C), Mesófila (25° a 45° C) y Termófila (45° a 60°C), pero la temperatura de diseño será  $35 \pm 2^\circ\text{C}$ , rango óptimo de la escala mesofílica.

### 3.1.3. Volumen:

El volumen total del reactor es de 20lts., el 15% del volumen se utiliza como almacenamiento de biogás, por lo tanto el volumen útil se describe mediante la Ecuación (1):

$$V_t = V_u \times (1 + 0,15) \text{ en lts} \quad (1)$$

El volumen útil del reactor es de 17,39 lts.

### 3.1.4. Carga Orgánica Volumétrica (COV):

Adoptando un valor de  $2 \text{ kgMV} / \text{m}^3 \cdot \text{d}$ , la cual asegura un correcto mezclado para este tipo de reactores, la cantidad total de masa volátil dentro del sistema será de 0,03478 kg MV.

### 3.1.5. TRH

El tiempo de retención hidráulico (TRH) está relacionado con la COV, y la temperatura de trabajo. Este factor indica el tiempo de residencia de la biomasa dentro del reactor. El límite inferior está relacionado con la tasa de reproducción de las bacterias, al retirar efluente se extrae también una determinada cantidad de microorganismos, entonces el tiempo seleccionado debe asegurar que la multiplicación de las bacterias sea por lo menos la misma cantidad extraída.

### 3.1.6. MS y MV

Dado que el reactor es para investigación del desempeño de distintos sustratos sometidos a digestión anaeróbica, el sistema de alimentación de residuo exige que la digestión sea húmeda con un 10 a 12% de MS.

El diseño del sistema estructural de estanqueidad cuenta con una estructura soporte para el recipiente, una tapa de acero inoxidable, una descarga de lodos lateral y una en el fondo, y una estructura para el sistema de agitación. La Figura 1 muestra el diseño del sistema.



Figura 1 Sistema estructural de estanqueidad.

## 3.2. Sistema alimentación y extracción de lodos

Este sistema tiene como finalidad permitir la entrada de residuo nuevo y la extracción de los digeridos del reactor a través de las válvulas de salida, o en su defecto la toma de muestra del residuo en proceso, sin perder las condiciones anaeróbicas. En la Figura 2 se muestra el movimiento del fluido y las bridas de descarga.



Figura 2 Alimentación y descarga de lodos.

### 3.3. Sistema de equilibrio térmico

PR.E.Di.An. 1 está dotado con una resistencia de 220V/1000 Watts adosada a la tapa de acero inoxidable, controlada por un sensor PT100 conectado a un controlador lógico programable, y un sistema de agitación que se activa a intervalos de tiempo programados y cuando se enciende la resistencia.

En la Figura 3 puede observarse las diferentes partes que componen el sistema de estabilización de temperatura, y su ubicación dentro del prototipo.



Figura 3 Sistema de equilibrio térmico.

Las necesidades de calor del reactor pueden ser analizadas de acuerdo a la siguiente ecuación de pérdidas, considerando que una buena aproximación se logra suponiendo que las propiedades físico-químicas del fango son iguales a las del agua [6].

$$Q_p = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (2)$$

en donde  $Q_p$ =Pérdida de energía calórica a través de las paredes en W,  $U$ =Coeficiente global de transmisión de calor en  $W/(m^2 \cdot C)$ ,  $A$ =Área de sección transversal en  $m^2$  y  $\Delta T$ =diferencia de temperatura entre el interior y el exterior

El coeficiente global de transmisión puede interpretarse mediante el concepto de resistencia térmica, siendo

$$U \cdot A = 1/R_{total} \quad (3)$$

$$R_{\text{total}} = R_{\text{Conv.ext.}} + R_R + R_{\text{Conv.int.}} \quad (4)$$

donde  $R_{\text{Conv.ext.}}$  = Resistencia térmica para la transferencia de calor por convección exterior en  $^{\circ}\text{C/W}$ ,  $R_R$  = Resistencia térmica para la transferencia de calor por conducción del reactor en  $^{\circ}\text{C/W}$ ,  $R_{\text{Conv.int.}}$  = Resistencia térmica para la transferencia de calor por convección interior en  $^{\circ}\text{C/W}$ .

La resistencia térmica equivalente del reactor es de  $R_{\text{total}} = 0,247 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$

Las pérdidas térmicas totales del reactor serán de 60 W, que resultan de remplazar los valores en la Ecuación (5).

$$Q_p = \Delta t / R_{\text{total}} \quad (5)$$

### 3.4. Sistema de agitación y mezclado

Existe diferente forma de producir agitación y/o mezclado, entre ellas se encuentra la recirculación del sustrato mediante bombas, inyección del gas a través del licor del reactor y agitación mecánica. Pr.E.Di.An. 1 estará dotado de un agitador mecánico.

Uno de los factores a tener en cuenta cuando se decide utilizar un sistema de agitación y mezclado mecánico, es la velocidad de agitación. El motor CC de 60W de agitación está alimentado con un modulador de ancho de pulso (PWM), el cual permite regular las velocidades entre un rango de 130 a 0 RPM. Los componentes del sistema son el motor CC, dos acoplamientos flexibles, una caja multiplicadora con relación 1:2, el agitador de 147 mm de diámetro, inclinado  $15^{\circ}$  respecto de la vertical con paletas de ángulo variable, y el sensor óptico para contar las revoluciones. La Figura 4 muestra el sistema de agitación y mezcla.

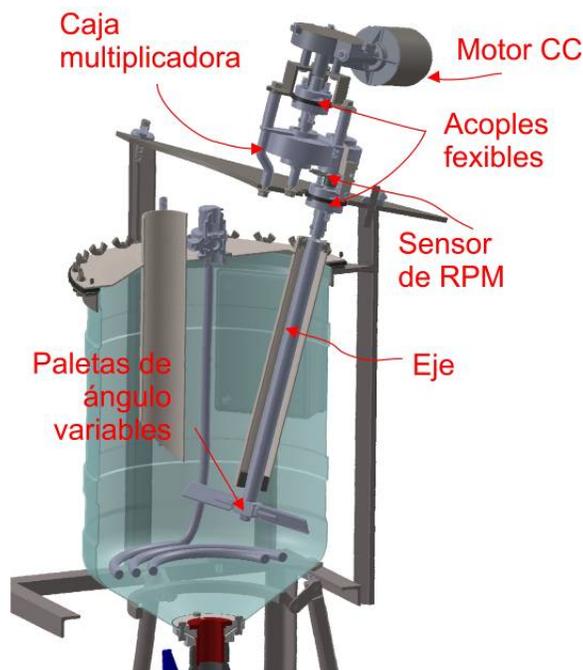


Figura 4 Sistema de agitación y mezcla.

### 3.5. Sistema de electrificación, electrónica y automatización

El sistema eléctrico está diseñado para comandar 3 reactores desde un tablero con IP65, tiene una entrada bifásica de 220VAC con neutro, en su interior se encuentran dos fuentes de corriente continua, una de 12VDC y 200W que alimenta los motores de agitación, y la otra de 24 VDC y 24W desde donde se alimenta la parte control y accionamientos, parte que está conformada por interruptores para encender los reactores, un relé programable Easy 821-DC-TC de Moeller que comanda el accionamientos de los relés de contacto de los motores y las resistencias, y la entrada de los transmisores de temperatura y sensores de rpm. El Easy 821 está conectado a un transmisor Ethernet Easy 209-SE desde donde se lo conecta red interna con un router permitiendo el acceso desde una computadora de escritorio. Como se describió en la sección 3.4 el control de la velocidad de los reactores se lleva a cabo por tres PWM de 8amp con control remoto.

La conexión de los reactores se lleva a cabo por medio de una caja de borneras situada en los reactores.

Las Figuras 5 y 6 muestran el esquema eléctrico y la distribución dentro del tablero.

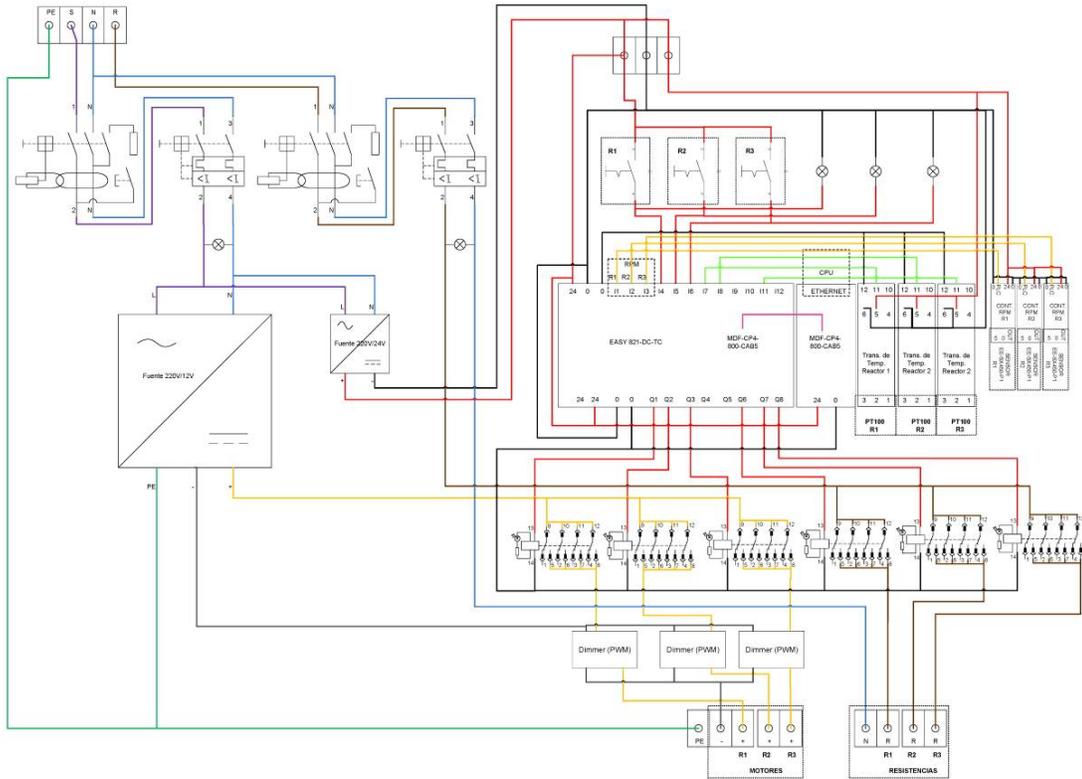


Figura 5 Esquema eléctrico

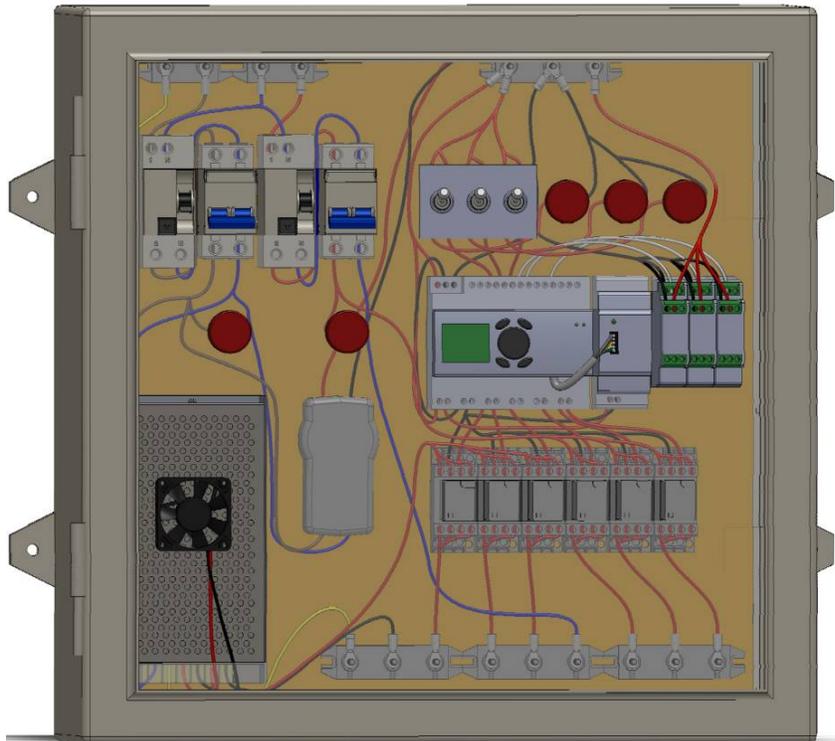


Figura 6 Tablero eléctrico

### 3.6. Transporte, almacenamiento y utilización de biogás

Este sistema está compuesto por las mini válvulas esféricas de 1/2" con conector Conek CC10-G04 adosados a la tapa del reactor, dos registros para toma de muestra o medición de presión mediante una mini válvula con una Tee Macho CB 10-G04, una trampa de llama húmeda que sirve como trampa anti-retorno, la campana variable contrapesada, una trampa de llama seca y un mechero Bunsen como antorcha de biogás.

El biogás producto de la degradación de la materia orgánica es transportado hacia la trampa de llama húmeda, donde luego es empujado a almacenarse en la campana variable. Alcanzado el nivel máximo de almacenamiento del gasómetro se procede a cerrar las válvulas del reactor, se eliminan los contrapesos de la campana para originar una presión positiva y así enviarlo al mechero Bunsen para evaluar la calidad de la llama. La Figura 7 muestra los diferentes componentes del sistema de transporte, almacenamiento y utilización de biogás.

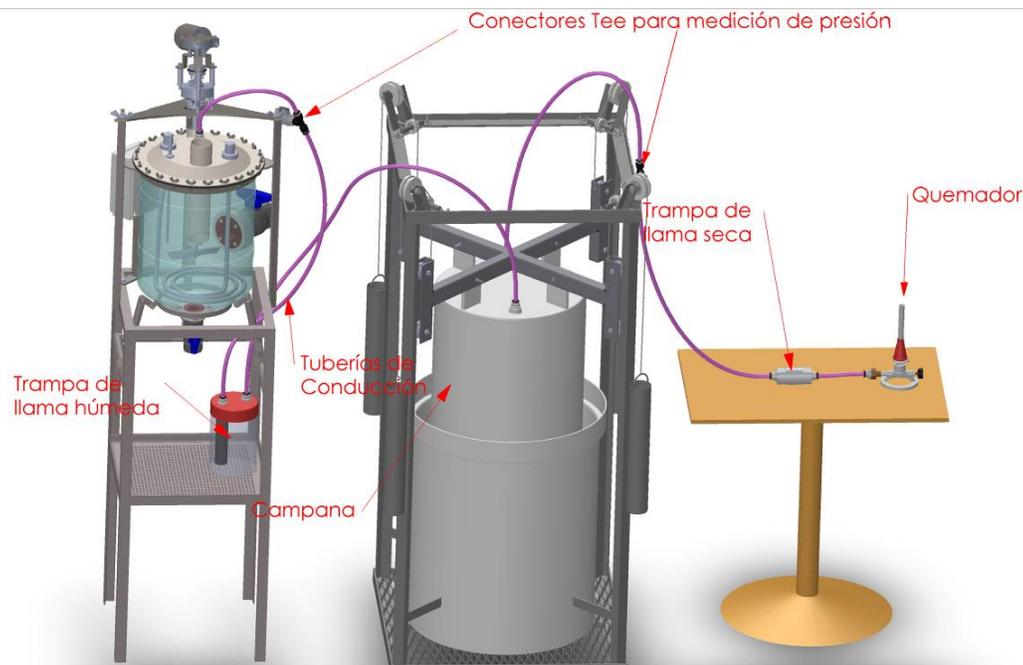


Figura 7 Sistema de transporte, almacenamiento y utilización de biogás

### 3.7. Sistema de seguridad

El sistema de seguridad del reactor resguarda dos aspectos fundamentales. El primero es la seguridad de las personas que estarán en contacto con el reactor, y el segundo hace referencia al desequilibrio no esperado de algunas de las variables, las formas de aviso y su accionar de caución.

#### 3.7.1. Seguridad frente a las personas

Las personas deben ser resguardadas ante contactos indirectos de electricidad y los peligros ante el aumento de la presión y quema de biogás. En el reactor se tomaron los recaudos de cubrir mediante bornes de poliamida la conexión de las resistencias (220vac de tensión), y se conectó la tapa de acero inoxidable a tierra. El tablero cuenta con un interruptor diferencial de 30mA por cada fase y un frente de policarbonato que aísla las conexiones eléctricas. Con respecto a la utilización del biogás, como se describió en secciones anteriores, se utilizaron trampas de llama húmeda y seca para evitar el retroceso de la llama y su ingreso al gasómetro y reactor.

El aumento en la presión dentro del reactor está regulado por la altura del nivel de la trampa de llama húmeda, dicho nivel no es superior a 2cm. En caso dicho sistema se inutilice por alguna razón desconocida, el caño de alimentación sirve como válvula de alivio, empujando el efluente a salir por el mismo.

#### 3.7.2. Seguridad ante desequilibrios no esperados de variables

La variable peligrosa frente desequilibrios no esperados es la temperatura, la rotura de la sonda pt100 puede originar que el relé programable deba encender la resistencia, para evitar esto la programación reconoce que cuando se exceden los límites establecidos las resistencias permanezcan apagadas.

Concluido el proceso de diseño, se procedió a la construcción de las distintas partes, que requirió procesos de soldadura, moldeo de plásticos, creación de multiplicadores de velocidad, torneados, y hasta mecanizados a través de CNC. Finalizado este proceso, se realizaron ensayos de presurización a  $0,2 \text{ kg/cm}^2$ , homogeneidad térmica, y ensayos de respuestas con agua.

En las Figuras 8 y 9 puede observarse el prototipo y cada uno de sus componentes listo para funcionar.



Figura 8 Pr.E.Di.An. 1



Figura 9 Sistemas y componentes individuales

#### 4. RESULTADOS

En el ensayo de presurización se sometió a  $0,2 \text{ kg/cm}^2$  durante dos 2hs. Varnero Moreno [4] establece que la presión interna de un reactor con cúpula fija, como los biodigestores chinos, puede alcanzar 100 cm H<sub>2</sub>O, el código ASME B31.3-2002 [5] establece que la presión de la prueba debe ser del 10% más alta de la presión de diseño. Los resultados de la prueba arrojaron que el reactor no solo es capaz de soportar el 10% de la presión de diseño, sino que no manifiesta fugas al doble de dicha presión.

El ensayos de homogeneidad térmica demostró los beneficios de la agitación en la distribución de la temperatura dentro del reactor, sin agitación las mediciones arrojaron 1°C de diferencia entre el sensor instalado en la tapa y el inferior del reactor.

El ensayo de respuesta con agua manifestó el comportamiento del reactor acorde a las condiciones de diseño planificadas.

#### 5. CONCLUSIONES

Pr.E.Di.An. 1 reúne las condiciones necesarias para realizar la evaluación de degradación de una diversidad de residuos mediante la tecnología de digestión anaeróbica húmeda. El diseño flexible hace posible adicionar partes al proceso y/o variar los parámetros con gran facilidad.

Las acciones futuras requerirán la evaluación del comportamiento de efluentes a diferentes temperaturas y rangos de agitación, el análisis del biogás resultante mediante cromatografía gaseosa y el diseño de los filtros correspondientes a la purificación del mismo.

#### 6. REFERENCIAS

- [1] Campaña H., Basaglia A., (2004). Anaerobic digestion of activated sludges from malting wastewaters . Industrial-Organic agriculture cooperation – 1 st part Laboratory Stage . 10 th World Congress Anaerobic Digestion – Montreal – Canada – Proceedings Volume 4. pp 2086 – 2089.
- [2] Dido C. et al. (2013). Evaluación técnico económica del tratamiento anaeróbico de los efluentes de un tambo de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Avances en Ciencias e Ingeniería. Volumen 4, N°4, pp 65-74. Chile
- [3] Moncayo Romero, Gabriel. (2012). Biodigestores: manual práctico de diseño. México. Aqualimpia.
- [4] Varnero Moreno, M. Teresa. (2011). Manual de Biogás. Santiago de Chile. Ministerio de energía. 1ra edición.
- [5] American National Standards Institute (2002). Process Piping. Recuperado el 1 de febrero del 2013 del sitio web de Oslo and Akershus University College of Applied Sciences de Noruega: <http://www.iu.hio.no/~pererikt/Konstr/Konstr-design-II/standarder/ASMEB31.3-1.pdf>
- [6] Tchobanoglous, George et al. (2000). Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y utilización. Madrid. 3<sup>ra</sup> edición. McGraw-Hill. España.
- [7] Robert H. Perry et al (1994). Manual del ingeniero químico.6ta edición. McGraw-Hill. Mexico.