

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO DE LECHO FIJO  
PARA OPERACIÓN EN CONTINUO A ESCALA PILOTO CON CONTROL DE  
TEMPERTURA Y pH**



**GUILLERMO ANDRÉS MARTÍNEZ RAMÍREZ  
CAROLINA RODRÍGUEZ WALTEROS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2007**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO DE LECHO FIJO  
PARA OPERACIÓN EN CONTINUO A ESCALA PILOTO CON CONTROL DE  
TEMPERTURA Y pH**

**GUILLERMO ANDRÉS MARTÍNEZ RAMÍREZ  
CAROLINA RODRÍGUEZ WALTEROS**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico**

**DIRECTOR:**

**EDGAR FERNANDO CASTILLO MONROY**

**Ingeniero Químico, PhD.**

**CODIRECTORA:**

**LIGIA PATRICIA ARENAS**

**Ingeniera Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2007**

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestros sinceros agradecimientos:

Al Doctor Edgar Fernando Castillo por su apoyo y aporte de valiosas ideas durante el desarrollo de este trabajo de grado.

A la Ingeniera Ligia Patricia Arenas por su colaboración y motivación.

A cada una de las personas que hacen parte del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales – CEIAM quienes de una u otra manera colaboraron para la realización de este trabajo.

A Hernán Garnica por sus asesorías.

*A Dios, por dame la sabiduría para alcanzar esta meta.  
A mi madre, Teresa, quien con su apoyo y cariño invaluable me dio  
fortaleza para llevar a buen término esta etapa de mi vida.  
A mi padre, Omar, quien en poco tiempo me enseñó mucho.  
A mi hermano Omar por su cariño, buen humor y compañía constantes.  
A Guillermo, por su inmenso cariño y por su compromiso con este proyecto.  
A mis amigos por su motivación.*

*CAROLINA*

*A mi Madre, a mi Padre,  
a mi Familia , a Carolina y a mis amigos...*

*Guillermo Andrés Martínez R.*

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1 DEFINICIÓN DE DIGESTIÓN ANAEROBIA	3
1.2 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE CONTROL	3
1.3 COMPONENTES BÁSICOS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL	4
1.3.1 Sensores y transmisores	5
1.3.2 Controladores	5
1.4 ESTRATEGIAS DE CONTROL	6
1.4.1 Control por retroalimentación	6
1.4.2 Control proporcional al tiempo	7
1.5 TIPOS DE CONTROLADORES POR RETROALIMENTACIÓN	7
1.5.1 Controlador de dos estados (on/off)	8
1.5.2 Controlador proporcional (P)	8
1.5.3 Controlador proporcional-integral (PI)	9
1.5.4 Controlador proporcional-integral-derivativo (PID)	9
1.6 ADQUISICIÓN DE DATOS ANALÓGICOS	10
2. DISEÑO Y MONTAJE DE UN SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA LA FASE METANOGÉNICA A ESCALA PILOTO	12
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA	13
2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO	15
2.2.1 Reactor metanogénico	15
2.2.2 Equipos auxiliares	17

2.3 DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL PARA EL REACTOR METANOGENICO	20
2.3.1 Diseño del sistema de control de temperatura	20
2.3.2 Diseño del sistema de control de pH	22
3. DISEÑO DE LA INTERFAZ GRÁFICA PARA MONITOREO, Y CONTROL DE VARIABLES	25
3.1 DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO DE LA INTERFAZ	25
3.2 RESPUESTA DEL SISTEMA AL CONTROL DE TEMPERATURA	29
CONCLUSIONES	32
RECOMENDACIONES	33
BIBLIOGRAFÍA	34
ANEXOS	36

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Rangos de flujo para los rotámetros	19
Tabla A.1. Parámetros de los microorganismos limitantes del proceso	36
Tabla A.2. Parámetros de diseño habituales para un sedimentador secundario	38
Tabla C.1. Especificaciones módulos de entrada y salida	58
Tabla C.2. Rangos de medida de las señales analógicas de entrada y salida para cada módulo	58
Tabla C.3. Especificaciones módulo de interfaz en red RS-232	58
Tabla C.4. Especificaciones Fuente de alimentación	59
Tabla C.1. Costos del sistema metanogénico	68

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Esquema del principio de control proporcional al tiempo	7
Figura 2. Proceso de Adquisición de Datos Analógicos con un PC	11
Figura 3. Diagrama de bloques del desarrollo del trabajo	12
Figura 4. Esquema general del sistema metanogénico	14
Figura 5. Sistemas de control de temperatura y pH	21
Figura 6. Montaje final del sistema metanogénico	24
Figura 7. Partes principales de la interfaz	26
Figura 8. Comportamiento de la temperatura del sistema en lazo cerrado	29
Figura B.1. Plano del reactor metanogénico	44
Figura B.2. Detalles de visores, platina y termopozo en el reactor metanogénico	45
Figura B.3. Detalles del tope del reactor	46
Figura B.4. Arreglo de canastillas y distribuidor del alimento	47
Figura B.5. Sedimentador	48
Figura B.6. Tanque de retorno de la bomba centrífuga	49
Figura B.7. Detalle mezclador y calentador	50
Figura B.8. Tanque para almacenamiento de la solución reguladora de pH	51
Figura B.9. Estructura de soporte del sistema metanogénico	52
Figura B.10. Tabla de la Mesa	54
Figura C.1. Fotografía del medidor de biogás	55

Figura C.2. Fotografía del sistema modular para monitoreo y control FieldPoint	57
Figura C.3. Fotografías del electrodo de pH y la bomba de diafragma	60
Figura C.4. Fotografía de la caja de control	61
Figura C.5. Diagrama de potencia de la caja de control	62
Figura C.6. Fotografía del sistema de calentamiento	64
Figura C.7. Fotografía del tanque de almacenamiento de bicarbonato	65
Figura C.8. Fotografía del dispositivo para mezclado	65
Figura C.9. Fotografía del detalle de los visores y canastillas	66
Figura C.10. Fotografía del sedimentador	66
Figura C.11. Fotografía del montaje tanque de retorno-sistema de filtros-bomba centrífuga	67
Figura E.1. Página TC1	71
Figura E.2. Página pH1	72
Figura E.3. Página CT	73
Figura E.4. Página PG	74

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
Anexo A. Cálculos para el diseño de los equipos	36
Anexo B. Planos del sistema metanogénico	43
Anexo C. Especificaciones y fotografías de los equipos	55
Anexo D. Costos del sistema metanogénico	68
Anexo E. Imágenes de la interfaz grafica	70

## RESUMEN

**Título:** DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO DE LECHO FIJO PARA OPERACIÓN EN CONTINUO A ESCALA PILOTO CON CONTROL DE pH Y TEMPERATURA\*

**Autores:** Carolina Rodríguez Walteros, Guillermo Andrés Martínez Ramírez \*\*

**Palabras claves:** Diseño reactor metanogénico, medición biogás, monitoreo y control.

### DESCRIPCIÓN:

Este trabajo surge de la necesidad de disponer de un reactor eficiente para la etapa metanogénica de la digestión anaerobia, que se pueda operar en continuo, construido con materiales resistentes a la corrosión, con el cual sea posible probar distintos empaques para formación de biopelícula y que cuente con monitoreo y control permanentes de temperatura y pH.

Para cumplir con este objetivo se diseñó y construyó un sistema para la etapa metanogénica, para operación en continuo, conformado básicamente por un reactor de flujo descendente, lecho fijo y con recirculación de efluente; de 145,8 cm de altura total y 4 pulgadas de diámetro, construido en acero inoxidable 316, y un conjunto de equipos auxiliares. Además, se construyó un dispositivo diseñado por los autores, para medición del volumen de biogás producido en el digestor.

Se diseñó e implementó, además, un sistema de monitoreo y control de pH y temperatura para el reactor metanogénico, con sensores en línea, un dispositivo de alta tecnología para adquisición de datos y control, y un ordenador desde el cual el operario puede interactuar con el reactor a través de una interfaz gráfica de usuario, que fue diseñada por los autores utilizando LabVIEW 7.0.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Ph.D Edgar Fernando Castillo Monroy.

## ABSTRACT

**Title:** DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PILOT SCALE FIXED BED ANAEROBIC BIODIGESTOR FOR CONTINUOUS OPERATION WITH CONTROL OF pH AND TEMPERATURE\*

**Authors:** Carolina Rodríguez Walteros, Guillermo Andrés Martínez Ramírez \*\*

**Keywords:** Methanogenic reactor design, biogas measurement, monitoring and control.

### DESCRIPTION:

This work arises from the necessity to have an efficient reactor to the methanogenic stage of the anaerobic digestion, which can be operated in continuous, constructed with resistant materials to the corrosion, with which it is possible to prove different packings for biofilm formation and that counts on permanent monitoring and control of temperature and pH.

In order to fulfill this objective a system for the methanogenic stage was designed and constructed, for operation in continuous, conformed basically by a downflow fixed bed reactor, and with effluent recirculation; of 145,8 cm of overall height and 4 inches of diameter, constructed in stainless steel 316, and a set of auxiliary equipment. In addition, a device designed by the authors was constructed, for measurement of the volume of biogas produced in the digester.

It was designed and implemented, in addition, a system to monitoring and control of pH and temperature for the methanogenic reactor, with sensors in-line, a device of high technology for data acquisition and control, and a computer from which the worker can interact with the reactor through a graphical interface of user, who was designed by authors using LabVIEW 7.0.

---

\* Degree Work

\*\*Faculty of Physicochemical Engineerings. School of Chemical Engineering. Project director Ph.D Edgar Fernando Castillo Monroy.

## INTRODUCCIÓN

En un sistema de Digestión Anaerobia (DA) en dos etapas existe una separación física de las poblaciones bacterianas y las condiciones de operación de cada reactor pueden ser establecidas selectivamente, esto promueve la especialización de los microorganismos de cada etapa. Por lo que un sistema de DA en dos etapas resulta más efectivo que en una etapa<sup>(1)</sup>.

Sin embargo, la etapa metanogénica de la digestión anaerobia, en particular, puede llegar a ser fácilmente inestable debido a que las bacterias metanogénicas son extremadamente sensibles a las fluctuaciones de temperatura, pH y carga, y son inhibidas por un gran número de compuestos. Por lo que esta etapa del proceso es conocida por requerir sistemas de monitoreo y control sofisticados<sup>(4)</sup>.

Para sistemas de digestión anaerobia a escala piloto, el pH y la temperatura son las variables que comúnmente se monitorean en línea a diferencia de otras como la alcalinidad y los ácidos grasos volátiles (AGV) que se miden fuera de línea. La implementación de un esquema de monitoreo permanente para la temperatura y el pH en el reactor metanogénico provee información útil para el análisis posterior del comportamiento de estas variables en el sistema<sup>(3)</sup>. Además, al adecuarle a esta etapa un sistema de control de pH y temperatura y al determinar los valores útiles de los parámetros de control para estas variables se obtiene un desempeño mucho más eficiente de la etapa<sup>(10)</sup>.

Este trabajo surge de la necesidad de disponer de un reactor eficiente para la etapa metanogénica de la digestión anaerobia, que se pueda operar en continuo, construido con materiales resistentes a la corrosión, con el cual sea posible probar distintos empaques para formación de biopelícula y que cuente con monitoreo permanente y control de pH y temperatura. En este trabajo se diseñó y construyó un sistema con las anteriores

características. Se diseñó, además, una interfaz gráfica para almacenamiento de datos, monitoreo y control de la temperatura y el pH en el reactor, utilizando LabVIEW 7.0.

El presente documento describe el desarrollo del trabajo y se encuentra dividido en tres capítulos. El primero contiene los fundamentos teóricos que se tuvieron en cuenta a la hora de diseñar el sistema. El segundo describe el diseño y montaje de cada uno de los equipos que conforman este sistema y las estrategias de control que se plantearon para el mismo. Y en el tercero se presenta la interfaz diseñada. El trabajo finaliza con las conclusiones y algunas recomendaciones.

Es importante anotar que este trabajo forma parte del proyecto “ESTUDIO DE LA HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA Y DE LAS BIOPELÍCULAS ANAEROBIAS, COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO CONTINUO EN DOS FASES DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS” aprobado en la Convocatoria Nacional de Proyectos de Investigación – Año 2004. Programa Nacional de Biotecnología.

## **1. MARCO TEÓRICO**

En la primera parte de este capítulo se presenta la definición básica de digestión anaerobia. Seguidamente se exponen algunos de los términos que se usan en el campo del control de procesos, se explican dos sistemas de control y los tipos más comunes de controladores. Y finalmente, se expone brevemente el proceso de adquisición de datos. En el Anexo A se presenta información adicional.

### **1.1 DEFINICIÓN DE DIGESTIÓN ANAEROBIA**

La Digestión Anaerobia (DA) es un proceso biológico natural en el que una comunidad entrelazada de bacterias coopera para formar una fermentación estable y autorregulada <sup>(11)</sup>. La materia orgánica residual es degradada y convertida en biogás (una mezcla de metano y dióxido de carbono principalmente), una suspensión acuosa o "lodo" que contiene los componentes difíciles de degradar y un efluente líquido.

El biogás producido contiene metano, dióxido de carbono, algunos gases inertes y compuestos de azufre. Típicamente se producen 100-200 m<sup>3</sup> de gas por tonelada de RSU orgánicos digeridos. Los sistemas de DA también llamados de fermentación, gasificación o metanización, utilizan reactores herméticos para controlar el proceso anaerobio y recoger el biogás producido.

### **1.2 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE CONTROL**

Los procesos industriales y de manufactura son de naturaleza dinámica, en ellos siempre ocurren cambios y si no se emprenden las acciones pertinentes, las variables importantes del proceso, es decir, aquellas que se relacionan con la seguridad, la calidad del producto y los índices de producción, no cumplirán con las condiciones de diseño.

En la mayoría de las plantas de procesos existen cientos de variables que se deben mantener en algún valor determinado. Con un procedimiento manual de corrección se requeriría una cantidad tremenda de operarios, por ello, sería preferible realizar el control de manera automática, es decir, contar con instrumentos que controlen las variables sin necesidad de que intervenga el operador. Esto es lo que significa el *control automático del proceso*.

El objetivo del control automático de procesos es mantener en determinado valor de operación las variables del proceso tales como: temperaturas, presiones, flujos y composiciones. En concreto, el sistema de control automático debe manipular una variable para mantener a la variable controlada en el punto de control o *set-point* a pesar de las perturbaciones <sup>(6)</sup>.

Las tres operaciones básicas que deben estar presentes en todo sistema de control, son:

- Medición (M): la medición de la variable que se controla se hace generalmente mediante la combinación de sensor y transmisor.
- Decisión (D): con base en la medición, el controlador decide que hacer para mantener la variable en el valor que se desea.
- Acción (A): como resultado de la decisión del controlador se debe efectuar una, acción en el sistema, generalmente ésta es realizada por el elemento final de control.

Estas tres operaciones, M, D y A son obligatorias para todo sistema de control. En algunos sistemas, la toma de decisión es sencilla, mientras que en otros es más compleja. El ingeniero que diseña el sistema de control debe asegurarse que las acciones que se emprendan tengan su efecto en la variable controlada, es decir, que la acción emprendida repercuta en el valor que se mide, de lo contrario el sistema no controla y puede ocasionar más perjuicio que beneficio <sup>(2)</sup>.

### **1.3 COMPONENTES BÁSICOS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL**

Los cuatro componentes básicos de todo sistema de control son:

- *Sensor*: que también se conoce como elemento primario.
- *Transmisor*: el cual se conoce como elemento secundario.
- *Controlador*: que es el ‘cerebro’ del sistema de control.
- *Elemento final de control*: frecuentemente se trata de una válvula de control aunque no siempre. Otros elementos finales de control comúnmente utilizados son las bombas de velocidad variable, los transportadores y los motores eléctricos.

**1.3.1 Sensores y transmisores.** Con los sensores y transmisores se realizan las operaciones de medición en el sistema de control. En el sensor se produce un fenómeno mecánico, eléctrico o similar, el cual se relaciona con la variable de proceso que se mide; el transmisor, a su vez, convierte este fenómeno en una señal que se puede transmitir y, por lo tanto, ésta tiene relación con la variable del proceso.

Existen tres términos importantes que se relacionan con la combinación sensor-transmisor: *la escala, el rango y el cero* del instrumento. A la *escala* del instrumento la definen los valores superior e inferior de la variable a medir del proceso. El *rango* del instrumento es la diferencia entre el valor superior y el inferior de la escala. El valor inferior de la escala se conoce como *cero* del instrumento, este valor no necesariamente debe ser cero para llamarlo así. Para el análisis de los sistemas de control es importante algunas veces obtener los parámetros con que se describe el comportamiento dinámico del sensor-transmisor.

**1.3.2 Controladores.** El controlador es el “cerebro” del circuito de control. Como se mencionó anteriormente, el controlador es el dispositivo que toma la decisión (D) en el sistema de control y, para hacerlo, el controlador compara la señal del proceso que llega del transmisor, la variable que se controla, contra el punto de control y envía la señal apropiada a la válvula de control, o cualquier otro elemento final de control, para mantener la variable que se controla en el punto de control.

Para determinar la acción del controlador, se debe conocer:

- Los requerimientos de control del proceso

- La acción del elemento final de control.

El controlador está en acción *inversa*, también denominada como acción de *decremento*, cuando hay un incremento en la señal que entra al controlador, y se presenta un decremento en la señal que sale del mismo. El controlador está en acción *directa*, también denominada como acción de *incremento*, cuando hay un incremento en la señal que entrada al controlador, y se presenta un incremento en la señal que sale del mismo.

## 1.4 ESTRATEGIAS DE CONTROL

En esta sección se presentan las dos estrategias de control que se consideraron convenientes para implementar en el reactor metanogénico diseñado.

**1.4.1 Control por retroalimentación.** Esta técnica la aplicó por primera vez James Watt hace casi 200 años, para controlar un proceso industrial que consistía en mantener constante la velocidad de una máquina de vapor con carga variable. En este procedimiento se toma la variable controlada y se retroalimenta al controlador para que este pueda tomar una decisión.

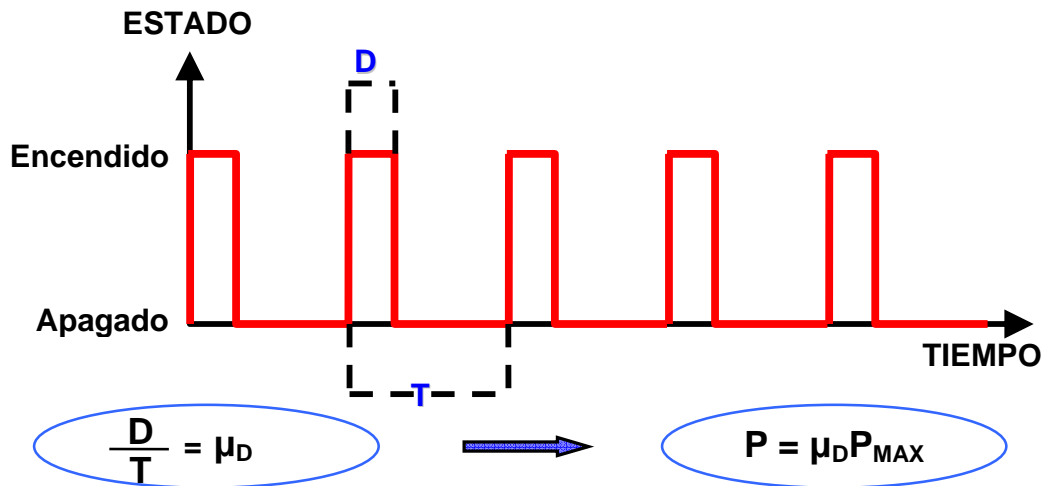
La respuesta oscilatoria de los sistemas de control por retroalimentación, muestra que la operación de estos es esencialmente una operación de ensayo y error que continua hasta que la variable controlada alcanza el punto de control, donde permanece posteriormente <sup>(22)</sup>.

- **Ventajas y desventajas.** La ventaja del control por retroalimentación consiste en que es una técnica muy simple, que compensa todas las perturbaciones. Cualquier perturbación puede afectar a la variable controlada, cuando ésta se desvía del punto de control, el controlador cambia su salida para que la variable regrese al punto de control. El circuito de control no detecta qué tipo de perturbación entra al proceso, únicamente trata de mantener la variable controlada en el punto de control y de esta manera compensar cualquier perturbación.

La desventaja del control por retroalimentación estriba en que únicamente puede compensar la perturbación hasta que la variable controlada se ha desviado del punto de control, esto es, la perturbación se debe propagar por todo el sistema antes de que la pueda compensar el control por retroalimentación.

**1.4.2 Control proporcional al tiempo.** El control proporcional al tiempo consiste en modular la potencia consumida por un elemento final de control y por ende la variable manipulada. Para aplicar este tipo de control se debe elegir un periodo de tiempo que se repite cada T segundos, definiendo la frecuencia de aplicación de tensión al elemento final de control. Este es alimentado solo durante un tiempo D que corresponde a una fracción de periodo denominada  $\mu_D$ . De esta manera la potencia entregada al elemento final de control es proporcional a la potencia máxima que este consume, con una constante de proporcionalidad  $\mu_D$ <sup>(1)</sup>.

Figura 1. Esquema del principio de control proporcional al tiempo



Fuente: Autores

## 1.5 TIPOS DE CONTROLADORES POR RETROALIMENTACIÓN

La manera en que los controladores por retroalimentación toman una decisión para mantener el punto de control, es mediante el cálculo de la salida con base en la diferencia entre la

variable que se controla y el punto de control o *set-point*. Los controladores aquí explicados se basan en acción inversa, es decir:

$$e(t) = \bar{S} - S(t)$$

S: punto de control, psig o mA

S(t): variable que se controla, psig o mA; esta es la señal que llega del transmisor.

e(t): señal de error, psi o mA; esta es la diferencia entre el punto de control y la variable que se controla.

**1.5.1 Controlador de dos estados (on/off).** En un sistema de control de dos posiciones, el elemento de actuación solo tiene dos posiciones fijas que, en muchos casos, son simplemente encendido y apagado. El control de dos posiciones o de encendido y apagado es relativamente simple y barato, razón por la cual su uso es extendido en sistemas de control tanto industriales como domésticos.

Supongamos que la señal de salida del controlador es  $u(t)$  y que la señal de error es  $e(t)$ . En el control de dos posiciones, la señal  $u(t)$  permanece en un valor ya sea máximo o mínimo, dependiendo de si la señal de error es positiva o negativa. De este modo:

$$u(t) = \begin{array}{l} U_1 : \text{ para } e(t) > 0 \\ U_2 : \text{ para } e(t) < 0 \end{array}$$

Donde  $U_1$  y  $U_2$  son constantes. Por lo general, el valor mínimo de  $U_2$  es cero o el negativo de  $U_1$ . Es común que los controladores de dos posiciones sean dispositivos eléctricos, en cuyo caso se usa extensamente una válvula eléctrica operada por solenoides<sup>(7)</sup>.

**1.5.2 Controlador proporcional (P).** Para un controlador con acción de control proporcional, la relación entre la salida y la entrada del controlador está dada por la siguiente ecuación que describe su funcionamiento:

$$m(t) = \bar{m} + k_c \cdot e(t)$$

donde:

$m(t)$ : salida del controlador, psig o mA.

m: valor base. El significado de este valor es la salida del controlador cuando el error es cero; generalmente se fija durante la calibración del controlador, en la mitad de la escala.

$k_C$ : ganancia del controlador.

Los controladores proporcionales son muy simples, con la ventaja de que sólo tienen un parámetro de ajuste,  $k_C$ ; la desventaja de los mismos es que operan con una desviación en la variable que se controla, en algunos procesos, esto puede no tener mayor consecuencia. En los casos en que el proceso se controla dentro de un rango del punto de control, los controladores proporcionales son suficientes; sin embargo, en los procesos en que el control debe estar en el punto de control, los controladores proporcionales no proporcionan un control satisfactorio <sup>(7)</sup>.

**1.5.3 Controlador proporcional-integral (PI).** La mayoría de los procesos no se pueden controlar con una desviación, es decir, se deben controlar en el punto de control, y en estos casos se debe añadir inteligencia al controlador proporcional, para eliminar la desviación. Este nuevo modo de control es la acción integral o de reajuste y en consecuencia, el controlador se convierte en un controlador proporcional-integral (PI). La siguiente es su ecuación característica:

$$m(t) = \bar{m} + k_C \cdot e(t) + \frac{k_C}{\tau_i} \cdot \int e(t) \cdot dt$$

Donde  $\tau_i$  es el tiempo de integración o reajuste (tiempo/repetición). Por lo tanto, el controlador PI tiene dos parámetros: la ganancia  $k_C$ , y el tiempo de reajuste  $\tau_i$ , que se deben ajustar para obtener un control satisfactorio. La ventaja de este controlador es que la acción de integración o de reajuste elimina la desviación <sup>(7)</sup>.

**1.5.4 Controlador proporcional-integral-derivativo (PID).** Algunas veces se añade otra acción al controlador PI, la acción derivativa, que también se conoce como rapidez de derivación o preactuación; tiene como propósito anticipar hacia dónde va el proceso, mediante la observación de la rapidez en el cambio del error, su derivada. La ecuación descriptiva es la siguiente:

$$m(t) = \bar{m} + k_C \cdot e(t) + \frac{k_C}{\tau_i} \cdot \int e(t) \cdot dt + k_C \cdot \tau_D \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

donde  $\tau_D$  es la rapidez de derivación en tiempo. Por lo tanto, el controlador PID tiene tres parámetros,  $k_C$ ,  $\tau_i$ , y  $\tau_D$ , que se deben ajustar para obtener un control satisfactorio.

La rapidez derivativa se da siempre en minutos. Los controladores PID se recomiendan para circuitos con constante de tiempo larga en los que no hay ruido. La ventaja del modo derivativo es que proporciona la capacidad de 'ver hacia dónde se dirige el proceso' <sup>(7)</sup>.

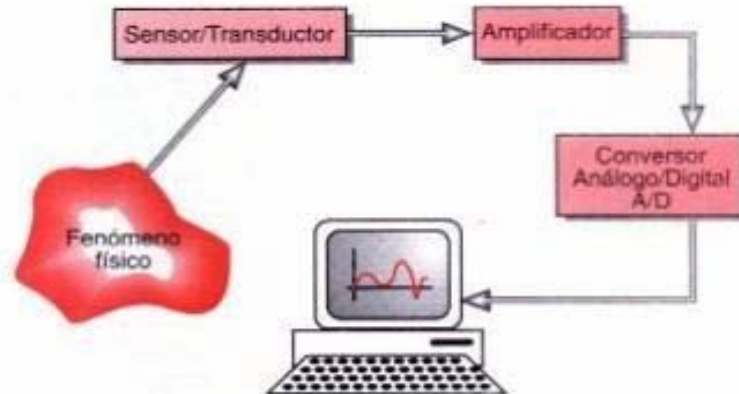
## 1.6 ADQUISICIÓN DE DATOS ANALÓGICOS

Se entiende por Adquisición de datos a la acción de medir variables, convertirlas a formato digital, almacenarlas en un computador y procesarlas en cualquier sentido. Este proceso necesita de una 'interfaz' entre el mundo físico y el computador que se suele denominar como tarjeta de adquisición de datos. El proceso de adquisición de datos del mundo físico conlleva los siguientes pasos fundamentales:

- Utilización de un sensor/transductor adecuado para la variable que se desea medir, el cual permite detectar y convertir la variable física en una señal analógica de voltaje o corriente eléctrica.
- Acondicionamiento de la señal eléctrica: en esta etapa se resuelven problemas relacionados con la señal obtenida, como son el ruido, la amplitud y/o potencia de la señal, la no linealidad de la misma, entre otras.
- Traducción de la señal eléctrica al lenguaje binario, propio del computador: este proceso se conoce técnicamente como conversión Analógica/Digital (A/D).
- Almacenamiento de los datos que, en forma digital, podrán ser almacenados en la memoria del computador y desplegados luego en la pantalla o en otro periférico del mismo.

La figura 2 muestra un diagrama conceptual del proceso de adquisición de datos, el cual sintetiza los pasos fundamentales ya mencionados.

Figura 2. Proceso de Adquisición de Datos Analógicos con un PC



Fuente: Autores

Una de las partes que componen los sistemas de adquisición de datos modernos DAQ (*Data Acquisition System*), basados en equipos PC (*Personal Computer*), es el software que controla y administra los recursos del computador, presenta los datos, y participa en el análisis.

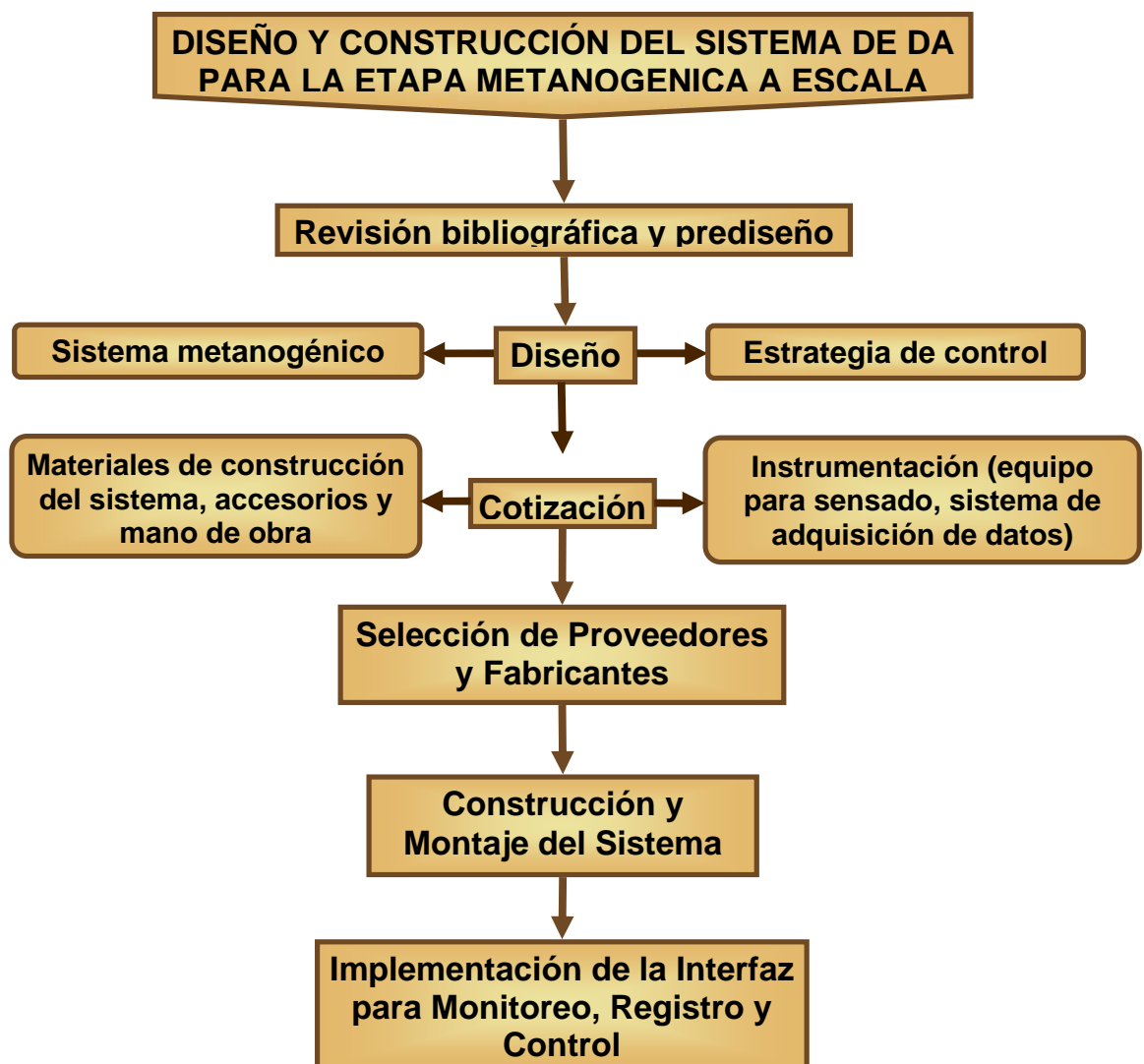
Visto de este modo, el software es una parte muy importante que requiere de especial cuidado. Para los sistemas DAQ se necesita de un software de instrumentación, que sea flexible para futuros cambios, y preferiblemente que sea de fácil manejo, siendo lo mas poderoso e ilustrativo posible.

En el mercado actual existen muchos programas y lenguajes de programación que cumplan con lo dicho, como por ejemplo el Visual Basic, el C, el C++, el Visual C++, Pascal, LabWindows CVI, Labview, y muchos otros confeccionados específicamente para las aplicaciones que los necesiten <sup>(2)</sup>.

## 2. DISEÑO Y MONTAJE DE UN SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA LA FASE METANOGENICA A ESCALA PILOTO

En este capítulo se describe la metodología empleada para el desarrollo del presente trabajo. En la figura 3 se esquematiza esta metodología.

Figura 3. Diagrama de bloques del desarrollo del trabajo



Fuente: Autores

Este trabajo se llevó a cabo en cuatro etapas: una etapa inicial de revisión de la información e investigaciones relacionadas con sistemas de DA, haciendo énfasis en la etapa metanogénica. Mediante la evaluación de características como tiempos de residencia y caudales de los sistemas de digestión anaerobia actualmente en operación en el CEIAM y la selección de los materiales y accesorios apropiados, se planteó el diseño preliminar del sistema metanogénico.

Una segunda etapa consistió en el diseño del reactor, sus equipos auxiliares y la distribución de los flujos, así como el diseño de las estrategias de control. La tercera etapa contempló las cotizaciones y selección de proveedores para la construcción final del sistema. Y la etapa final, donde se implementó la interfaz para monitoreo, registro y control.

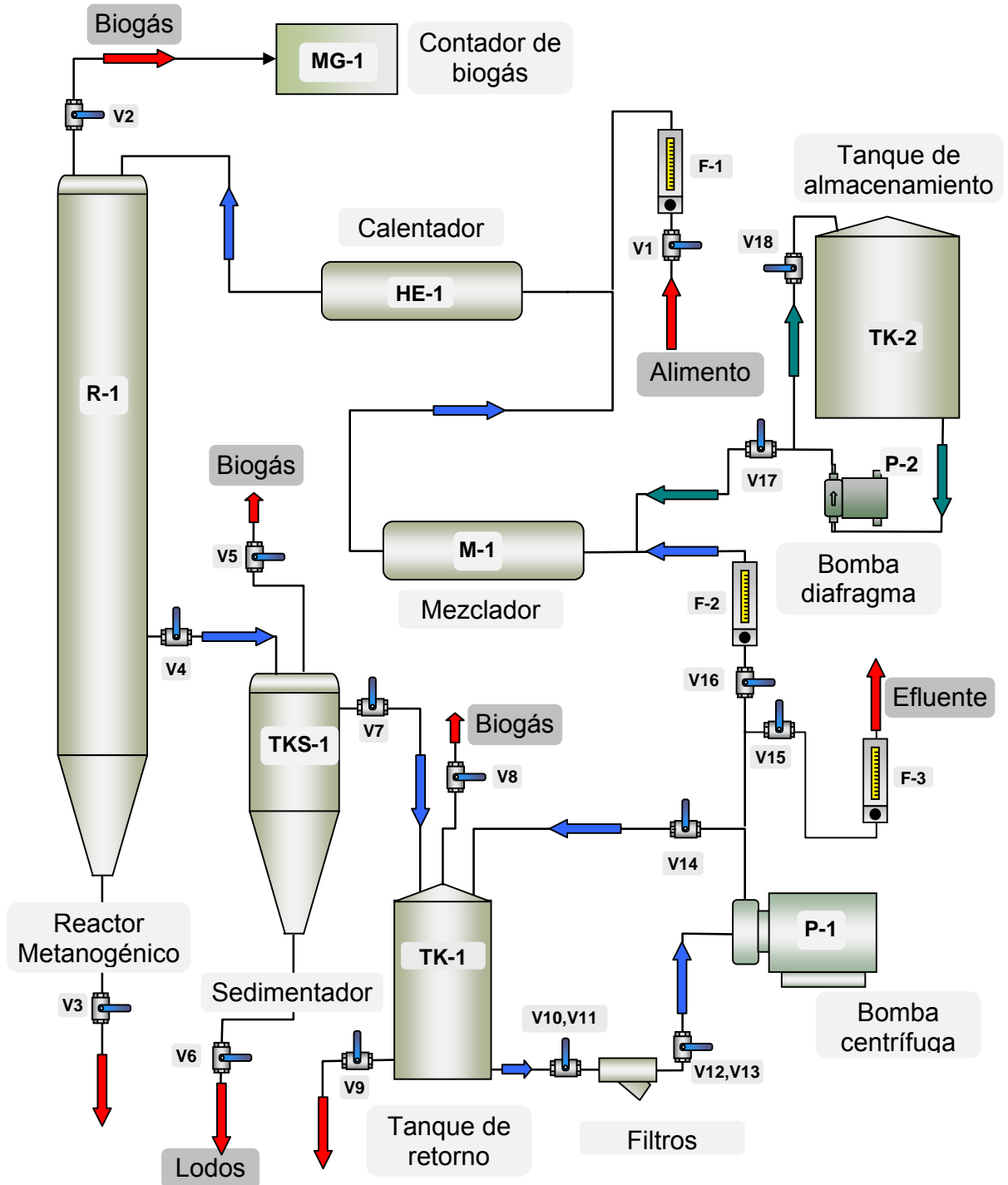
## **2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA**

A continuación se describe de modo general el sistema diseñado para la metanogénesis, indicando la secuencia de los equipos y la dirección de los flujos. En la figura 4 se muestran las principales partes que lo conforman.

El tiempo de residencia hidráulico de diseño para el *reactor* (R-1) es de 5,3 días. El efluente que abandona el reactor pasa a un *sedimentador cónico* (TKS-1). El líquido que sale de este equipo llega a un tanque cilíndrico (TK-1), pasa por un *sistema de filtros* tipo "Y" y es recibido por la *bomba centrífuga* (P-1). Una parte del flujo descargado por P-1 es retomado hacia TK-1 y la otra parte se divide posteriormente en dos corrientes: una que sale finalmente del proceso y otra es recirculada hacia el reactor.

El líquido de recirculación es conducido hacia un dispositivo equipado con baffles internos (M-1) (ver descripción en anexo C) donde se mezcla con la solución utilizada para el ajuste de pH. Esta corriente, junto con alimento fresco pasan a través del *calefactor* (HE-1) (ver descripción en anexo C) rodeado por la resistencia tipo abrazadera (150 W a 120 V). El fluido que pasa a través de HE-1 se calienta según la acción de control, esto permite regular la temperatura

Figura 4. Esquema general del sistema metanogénico



Fuente: Autores

dentro del reactor. El caudal de reciclo, de alimento fresco y de salida del sistema se fijan con los rotámetros.

La solución utilizada para el ajuste de pH es almacenada en un *tanque cilíndrico* (TK-2) y dosificada por medio de una bomba de diafragma (*Blue-White, Ref.: C-660P; 0,29 L/min a 60 psi*). El biogás producido como resultado de la digestión sale por el tope del reactor y es conducido a un medidor de gas. El reactor fue instrumentado con tres termocuplas tipo J y un electrodo de pH en línea (*Oakton, Ref.: WD-35806-21*). Los costos del sistema diseñado se presentan en el anexo D.

## **2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO**

La descripción de cada uno de los equipos que hacen parte del sistema metanogénico diseñado se presenta a continuación:

**2.2.1 Reactor metanogénico.** Consiste en un reactor de flujo descendente y lecho fijo, que consta de dos partes bien definidas: cuerpo del reactor y zona de sedimentación. Sus características se son:

### ***CUERPO DEL REACTOR:***

Diámetro externo: 10,2 cm

Diámetro interno: 9,7 cm

Altura Zona empacada: 100,7 cm

Volumen Zona empacada: 7,09 L

### ***ZONA DE SEDIMENTACIÓN:***

Altura Zona de sedimentación: 34 cm

Diámetro superior sección cónica: 4 pulg

Diámetro inferior sección cónica: 1 pulg

Volumen Zona de sedimentación: 1,73 litros

### ***TOTALES:***

Altura total: 145,8 cm

Volumen total: 8,82 litros

*MATERIAL:* Acero inoxidable 316

*MATERIAL DE LOS ACCESORIOS* (válvulas, acoples, etc): Acero inoxidable 316

El reactor se construyó en acero inoxidable tipo 316 que ofrece alto nivel de resistencia a la acción corrosiva de ácido fórmico, acético y otros ácidos orgánicos que van a estar presentes en el proceso. Los cálculos de diseño del sistema se presentan en el anexo A. Los planos del equipo se presentan en el anexo B.

- **Cuerpo del reactor.** La columna se construyó con tubo de acero inoxidable 316 de 4" de diámetro, cédula 10, completamente hermético (ver figura B.1). Está provisto de 5 mirillas de vidrio circulares ubicadas a lo largo del reactor, separadas 19 cm entre centros. Cada una sobresale de la superficie externa del reactor y termina con un sistema de férula y abrazadera (ver detalle en figura B.2). Dos válvulas de bola de 1" de diámetro se ubicaron en el costado del cuerpo del reactor, para permitir la extracción de muestras de líquido y biopelícula en cualquier momento del tratamiento.

El tope del reactor termina con un sistema de férula y abrazadera de acero inoxidable tipo sanitario, con tapa plana. En esta tapa se ubican dos conexiones de 1/4" NPT hembra, una para la entrada del alimento al reactor y otra para la evacuación de biogás hacia el dispositivo medidor de gas (ver detalle en figura B.3). El líquido ingresa al reactor por la tapa superior de este, a través de un plato distribuidor de flujo, el cual tiene 24 orificios para asegurar la uniformidad en la entrada del sustrato al biodigestor (ver detalle en figura B.4)

La parte interna del reactor contiene un arreglo de 8 canastillas cilíndricas de 7,8 cm de diámetro interno y 9,5 cm de altura, para el soporte del empaque; elaboradas en malla de acero inoxidable 316, cuya base es un plato perforado. Todas ellas están unidas por prisioneros a un eje central, que va desde la tapa del reactor, pasando por el distribuidor de la alimentación hasta la parte inferior donde termina el cuerpo del reactor (ver figura B.4).

- **Zona de sedimentación.** Consiste básicamente de un tramo de tubo de acero inoxidable 316 de 4" de diámetro, cédula 10, soldado a una sección cónica del mismo material, que termina en una válvula de bola de 1" que permite la evacuación de sólidos sedimentados (ver figura B.1). La zona de sedimentación se une al cuerpo del reactor por un sistema de férula y abrazadera. En la parte cilíndrica de esta zona, se inserta un electrodo de pH por medio de un accesorio con rosca de 3/4 " NPT hembra. Este sedimentador tiene como función lograr una primera sedimentación de partículas presentes en el reactor.

### 2.2.2 Equipos auxiliares

- **Sedimentador.** Está dividido en dos partes, la primera consiste en un tramo cilíndrico soldado a la segunda, una sección cónica del mismo material. Esta unidad termina en una válvula de bola de 1" que permite la evacuación de sólidos sedimentados (ver figura B.5). Este sedimentador tiene como función lograr una segunda sedimentación de partículas presentes en el licor que proviene de la zona de sedimentación del reactor. Las dimensiones son las siguientes:

Altura sección cilíndrica:	15 cm
Altura sección cónica:	19 cm
Altura total:	34 cm
Diámetro superior sección cónica:	4 pulg
Diámetro inferior sección cónica:	1 pulg
Volumen:	1,73 litros
Material:	Acero inoxidable 316
Material de los accesorios (válvulas, acoples, etc):	Acero inoxidable 316

- **Tanque de retorno.** Se diseñó un recipiente cilíndrico de 30 cm de altura, 20 cm de diámetro externo y 9,42 litros de volumen total, completamente sellado. Cuyo objetivo principal es recibir la corriente de desviación de la bomba centrífuga para aliviar el flujo de descarga de la misma. Además recibe el caudal que proviene del sedimentador secundario. Está fabricado en cold rolled calibre 16 y recubierto internamente con anticorrosivo epóxico de Sika.

Este tanque tiene cuatro conexiones: dos para entrada de líquido, una para salida de líquido y una para salida de gas; todas en 1/4" NPT hembra. En la parte inferior posterior cuenta con una válvula de bola de 1" para desalojo del contenido del tanque. El tanque posee un nivel de vidrio que puede retirarse para limpieza durante la operación gracias a un sistema de universales y válvulas de bola instalado (ver figura B.6).

- **Sistema de filtros.** Consiste en un par de filtros tipo 'Y', dispuestos para operar en paralelo que están ubicados entre el tanque de retorno y la bomba centrífuga. Están fabricados en acero inoxidable 316 con un diámetro nominal de 3/8". Poseen un filtro en forma de canasta que se puede extraer para limpieza retirando la tapa roscada del filtro; esta maniobra se puede hacer durante la operación del sistema gracias a un juego de válvulas y uniones universales, que permiten que siempre haya un filtro en operación.

- **Bomba centrífuga.** De construcción monobloque, marca Barnes, Modelo MC-2. Motor Siemens monofásico. Impulsor en plástico de alta resistencia y diámetro 3".

Flujo nominal (a 14,2 psi):	10 GPM	Potencia:	1/4 hp
Diámetro de la succión:	1"	Voltaje:	127 V
Diámetro de la descarga:	1"	Corriente:	4,2 A

- **Medidor de gas.** Con el objeto de medir el biogás que produce el reactor fue diseñado por los autores un dispositivo (ver fotografía en figura C.1) que cuenta con el siguiente principio de medición: el biogás proveniente del reactor llega a la boquilla de entrada del medidor de gas, fluye a través de un tramo de manguera que se comunica con un capilar localizado en la base del dispositivo medidor de gas. El gas asciende en forma de pequeñas burbujas a través del líquido contenido en una caja de acrílico. El gas llega a una celda de medida, que consiste en dos semiceldas de acrílico que se llenan alternadamente con las burbujas de biogás que ascienden. Así cuando una de las celdas está llena con biogás, gira rápidamente, la segunda comienza a llenarse y la primera se vacía. El gas que sale de la semicelda asciende hasta llegar al nivel del líquido en la caja y de allí pasa al exterior a través de la boquilla de salida.

La medición del volumen de biogás, por lo tanto, se basa en el conteo electrónico de pulsos, generados por la inclinación repetida de la celda de medición. Cada giro de dicha celda es comunicado por el eje de esta a un interruptor que permite el paso de un rayo de luz infrarroja (LIR) por un instante, a través de un orificio ubicado en el mismo interruptor. Este rayo de LIR excita un sensor conectado al circuito electrónico y convierte esta acción en un pulso eléctrico que es contado y visualizado como un número discreto en un *display* de 4 dígitos. Cada acción de llenado y vaciado de una semicelda corresponde a un ciclo, de modo que cada uno de estos ciclos, que es contado por el mecanismo del medidor y visualizado en el *display*, equivale a 3 ml. Por lo que el volumen de biogás medido corresponde al número de ciclos contados, que aparecen en el *display* multiplicado por el volumen de la semicelda (3 ml).

Vale la pena resaltar que este dispositivo no tiene antecedentes de fabricación en el país y se considera un desarrollo tecnológico particular de este trabajo de grado. Fotografías de cada componente del sistema se adjuntan en el Anexo C.

- **Caudalímetros de área variable.** Tres rotámetros, (*Cole-Parmer, Ref.: 03218-23; 03218-07 y 03218-07*) de lectura correlacionada, de 65mm, utilizados para medir y graduar el flujo volumétrico de la recirculación, el alimento y el efluente del sistema. Poseen una válvula de aguja de alta precisión para lograr un mejor control de caudal. En la tabla 1 se muestra el rango de caudal que maneja cada caudalímetro con agua.

Tabla 1. Rangos de flujo para los rotámetros (con agua a 70 °F)

Corriente	Flujo mín. (ml/min)*	Flujo máx. (ml/min)
Recirculación	1,0	108,3
Alimento	0,10	2,38
Efluente	0,10	2,38

*Fuente:* Cole-Parmer Instrument Company.

Las características de estos rotámetros son:

Conexiones (ubicadas en la parte posterior del instrumento):	1/8" NPT hembra
Conexiones para montaje en panel:	1/2" hexagonal macho
Tubo de flujo:	vidrio borosilicato
Flotador, válvulas y accesorios:	acero inoxidable 316
Temperatura de operación:	-26 a 121 °C

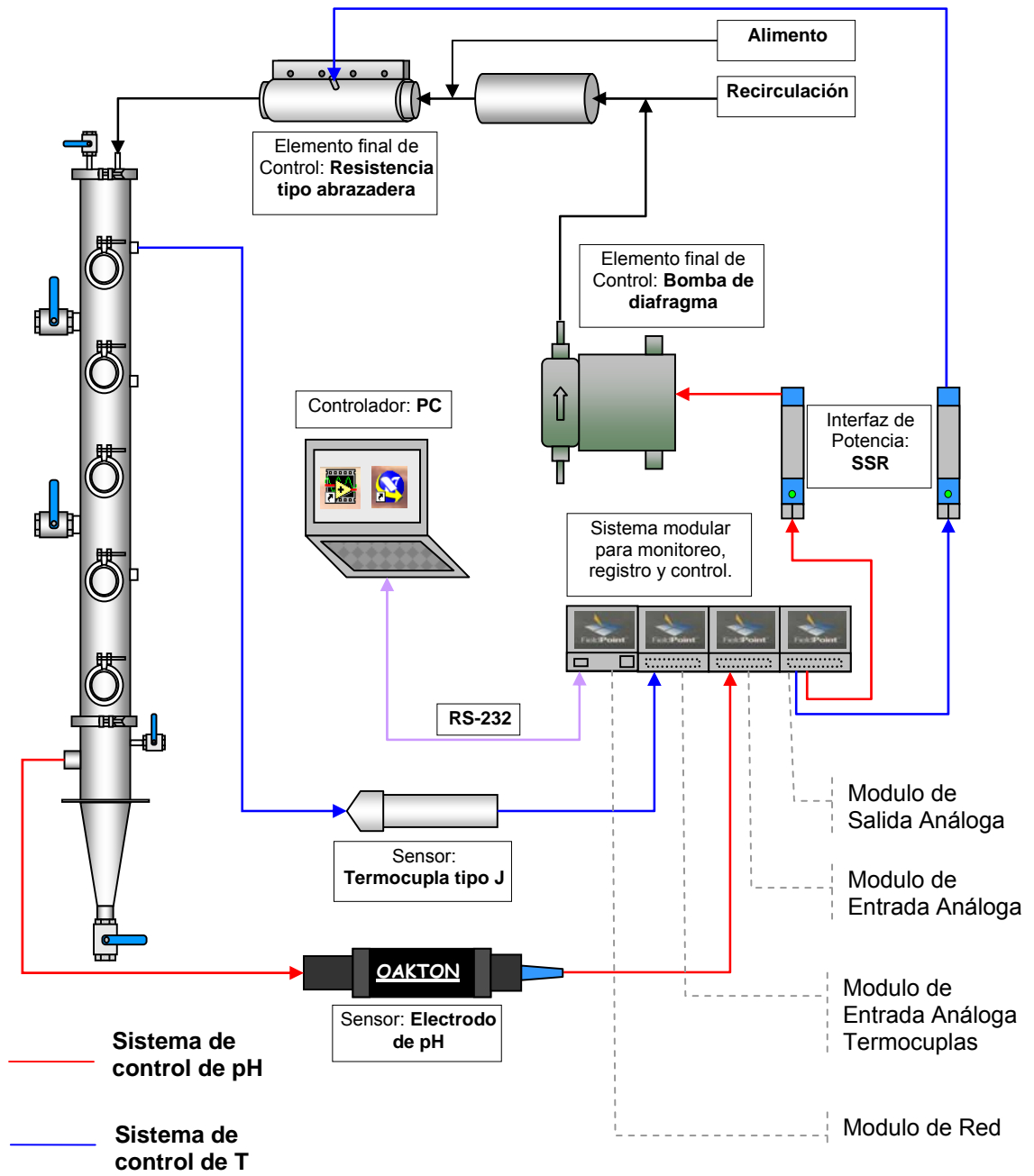
## 2.3 DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL PARA EL REACTOR METANOGENICO

La capacidad de tratamiento de un sistema de DA está determinada por variables como el pH y la temperatura, que tienen influencia directa en el metabolismo de las bacterias. Cada una de estas variables requiere monitoreo, evaluación y control constantes para evitar alteraciones en la actividad microbiana y aumentar así la eficacia de degradación anaerobia del sistema. Las estrategias de control desarrolladas para este sistema se basan en la combinación de las técnicas de control por retroalimentación y control proporcional al tiempo, que se explican en el capítulo 1 de este documento.

**2.3.1 Diseño del sistema de control de temperatura.** El objetivo de este sistema de control es regular la temperatura dentro del reactor metanogénico. Este sistema está conformado por tres sensores de temperatura (termocuplas tipo J), ubicadas a lo largo del digestor, un sistema para monitoreo, registro y control de las variables del proceso, un PC, un relé de estado sólido, una resistencia de calentamiento tipo abrazadera. En el anexo C se describen cada uno de los equipos que hacen parte de este sistema de control.

En la figura 5 se muestra un esquema del sistema de control de temperatura. Este lazo de control se puede describir de la siguiente forma: tres termocuplas sensan la temperatura dentro del reactor y se pueden seleccionar como variable a comparar con el *set-point* cualquiera de las tres. La señal de salida de estos sensores es analógica (en milivoltios) y se lleva al módulo de entrada para termocuplas del sistema FielPoint (FP-TC-120). Allí esta señal es filtrada y convertida a digital por un ADC (convertidor análogo digital) de 16 bits de resolución, el módulo de red FP-1000 del sistema FielPoint se encarga de enviar esta señal al computador a través

Figura 5. Sistemas de control de temperatura y pH



Fuente: Autores

del puerto serial RS-232. Por medio de la interfaz gráfica que se diseñó (y que se describirá en detalle en el capítulo 3), se establece el valor de referencia o *set-point* de este lazo de control. El controlador compara la señal recibida con el valor del *set-point*, evalúa el error correspondiente y toma la decisión de control.

Esta señal es enviada al módulo de red, el cual la comunica al módulo de salida (FP-AO-200) sistema FielPoint. En este último la señal es convertida a analógica por un DAC (convertidor digital analógico) de 12 bits de resolución. Esta señal es entonces enviada al relé de estado sólido que permite encender o apagar el elemento final de control, que en este caso es la resistencia.

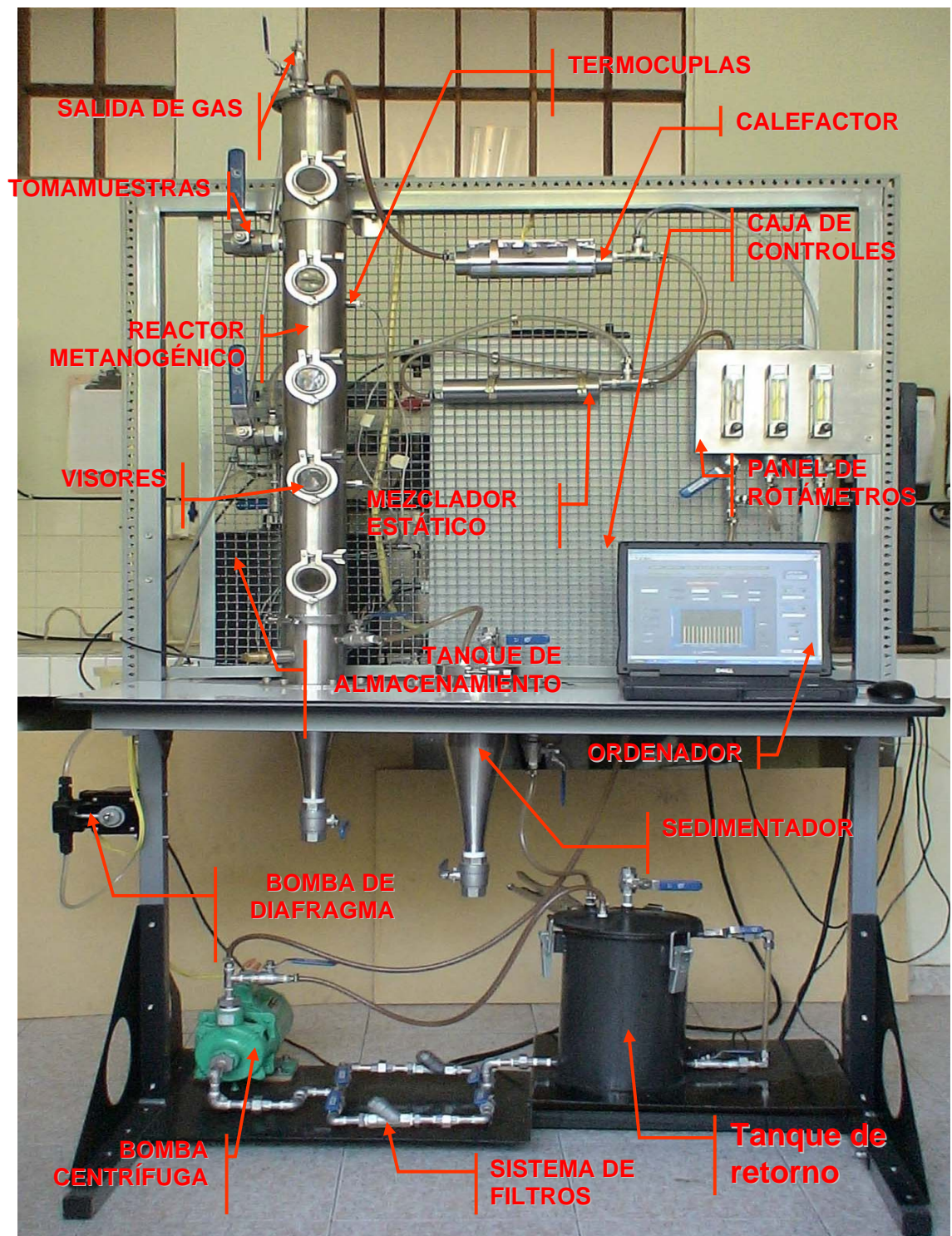
**2.3.2 Diseño del sistema de control de pH.** El pH es un importante parámetro de diagnóstico para un sistema de DA. Cada grupo de bacterias presenta un pH alrededor del cual presenta los óptimos de crecimiento. El pH óptimo para las *bacterias acetogénicas* está entre 6 y 7 y para las *metanógenas* dentro de 7,5 a 8,5<sup>(12)</sup>. Si las bacterias metanogénicas no alcanzan a convertir rápidamente los AGV como lo hacen las bacterias acidogénicas, éstos se acumulan, disminuye el pH en el digestor y como consecuencia la actividad metanogénica es inhibida.

El sistema de control de pH diseñado está conformado por: un sensor de pH en línea (*Oakton, Ref.: WD-35806-21*), el sistema para monitoreo, registro y control de las variables del proceso, un PC, un relé de estado sólido y una bomba de diafragma. En el Anexo C se describen cada uno de los equipos que hacen parte de este sistema de control. El objetivo de este sistema de control es mantener el pH dentro del reactor metanogénico en el rango de 6,5 a 8,5.

En la figura 5 se muestra un esquema del sistema de control de pH. Este lazo de control se puede describir de la siguiente forma: el electrodo de pH sensa esta variable, en la zona de sedimentación del reactor, la señal de salida del electrodo es analógica (en milivoltios) y se lleva al módulo de entrada del sistema FielPoint (FP-AI-110). Aquí la señal es filtrada y convertida a digital por un ADC (convertidor analógico digital) de 16 bits de resolución, el módulo

de red FP-1000 del sistema FielPoint se encarga de enviar esta señal al computador a través del puerto serial RS-232. Por medio de la interfaz gráfica que se diseñó, se establece el valor de referencia o *set-point* del lazo de control. El controlador compara la señal recibida con el valor de *set-point*, evalúa el error correspondiente y toma la decisión de control. Esta señal es enviada al módulo de red del sistema FielPoint, que la comunica al módulo de salida (FP-AO-200). En este último la señal es convertida a análoga por un DAC (convertidor digital análogo) de 12 bits de resolución. Esta señal es entonces enviada al relé de estado sólido que permite encender o apagar el elemento final de control, es decir la *bomba de diafragma*. En figura 6 se muestra el montaje final del sistema diseñado para la metanogénesis.

Figura 6. Montaje final del sistema metanogénico



Fuente: Autores

### **3. DISEÑO DE LA INTERFAZ GRÁFICA PARA MONITOREO, ALMACENAMIENTO Y CONTROL DE VARIABLES**

En este capítulo se describe la interfaz de usuario que se diseñó en el presente trabajo y su correspondiente aplicación en el sistema metanogénico diseñado.

La interfaz de usuario que se diseñó para este trabajo, fue desarrollada en *Labview 7.0* (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) el cual se basa en un lenguaje de programación gráfico o G. Se seleccionó este *software* por ser una herramienta apropiada para las tareas de adquisición de datos, instrumentación, automatización y control de procesos. Además, gracias a la facilidad de este tipo de programación, se requiere de menos tiempo para la elaboración de rutinas con interfaz gráfica.

El objetivo de esta interfaz gráfica, elaborada por los autores del proyecto, es permitir la interacción de una forma fácil, confiable y amigable, entre el usuario y la operación del reactor.

La interfaz gráfica se desarrolló para realizar fundamentalmente tres actividades:

- Visualizar numérica y gráficamente, en tiempo real, valores de mediciones de pH y temperatura, provenientes del reactor metanogénico y de un reactor hidrolítico que se encuentra en desarrollo en el CEIAM.
- Almacenar los datos recibidos en un tipo de archivo de Excel con extensión '.lvm'.
- Ejecutar el control de pH y temperatura del reactor metanogénico.

#### **3.1 DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO DE LA INTERFAZ**

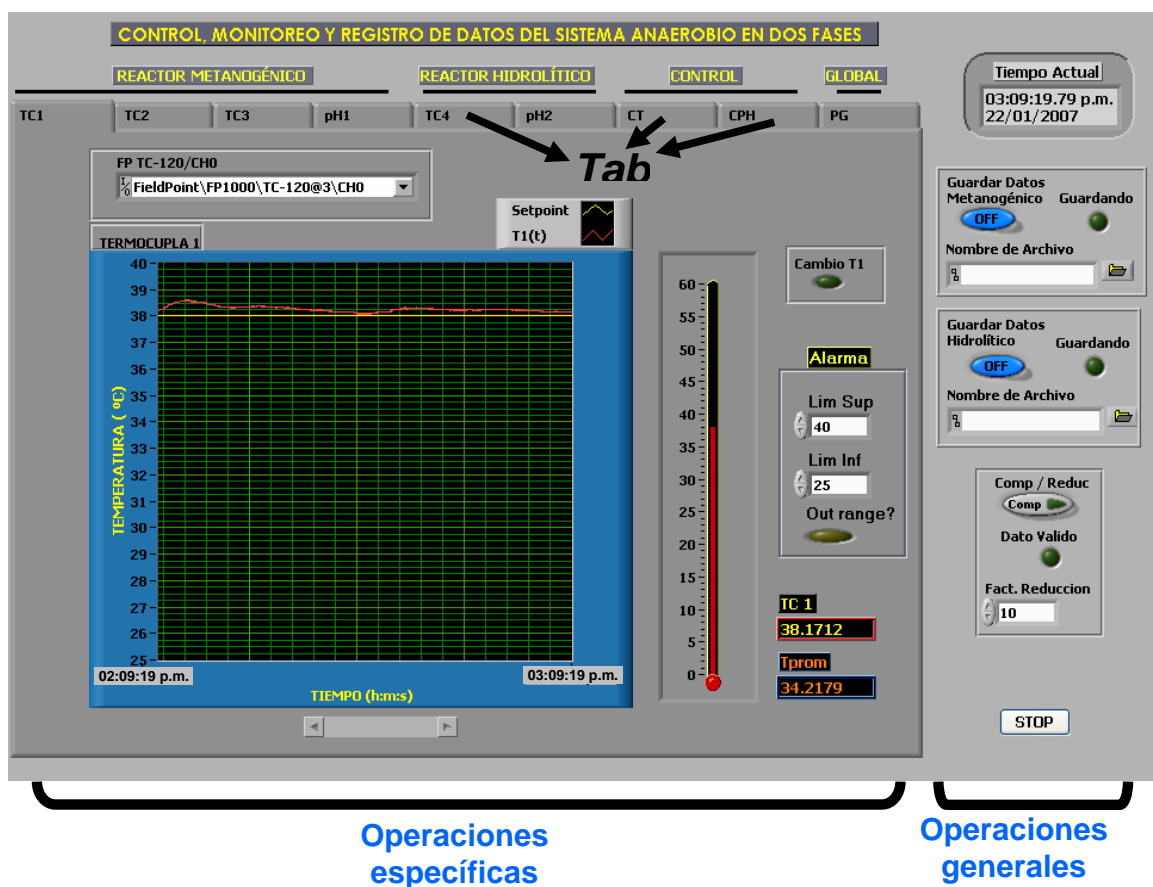
La interfaz de usuario así desarrollada se organizó en dos partes bien definidas:

- En la primera parte se pueden ejecutar acciones globales del programa como activar la opción de guardar los datos generados, ver fecha y hora actuales, reducir la cantidad de datos

que se vayan a almacenar, seleccionar el archivo específico en el que se desean guardar los datos, detener la ejecución del programa, entre otras.

- La segunda parte cuenta con un arreglo de nueve páginas a las que se puede acceder mediante una pestaña de selección o *tab*, de modo que el usuario pueda interactuar con el proceso de monitoreo y control de variables pertinentes al proceso de DA. En la figura 7 se pueden ver las dos partes generales que constituyen esta interfaz.

Figura 7. Partes principales de la interfaz



Fuente: Autores

A continuación se describe cada uno de los componentes de la interfaz y su respectiva aplicación en el sistema de DA.

- **Páginas TC1, TC2, TC3 y TC4:** en estas páginas fundamentalmente se visualiza el comportamiento de la temperatura que se mide a lo largo del reactor metanogénico con las termocuplas 1, 2 y 3; y aquella que se sensa en el reactor hidrolítico con la termocupla 4, respectivamente. Cada página contiene un indicador que muestra qué canal o ítem del módulo de entrada para termocuplas FP-TC-120, está siendo utilizado para la medición correspondiente.

Para las páginas TC1, TC2 y TC3, la temperatura de la respectiva termocupla, el valor del *set-point* y la temperatura promedio del reactor metanogénico ( $T_{Prom}$ ) se pueden ver en cualquier momento en una gráfica de T vs. tiempo. Cada una de estas páginas cuenta además con indicadores numéricos y gráficos (en forma de termómetro) que dan a conocer el valor de la temperatura para cada termocupla en tiempo real, así como un LED verde se enciende cuando se presentan cambios en la temperatura, del orden de 0,1 °C y un sistema de alarma, donde el usuario establece un rango dentro del cual debe encontrarse la temperatura de la termocupla correspondiente y en caso de que el valor esté por fuera de este rango, informa al usuario mediante el encendido de un LED y un sonido (ver figura E.1).

- **Páginas pH1 y pH2:** básicamente se visualiza el comportamiento del pH que se mide en el reactor metanogénico y el pH que se sensa en el reactor hidrolítico, cada uno mediante un electrodo de pH independiente.

Cada página contiene un *indicador* que muestra qué canal o ítem del módulo de entrada FP-AI-110, está siendo utilizado para la medición correspondiente. También cuentan con indicadores numéricos y gráficos tipo aguja que muestran el valor del pH en tiempo real, así como un LED verde que indica si se presentan cambios de pH del orden de 0,1. Además un sistema de alarma que a través de un LED y sonido informan al usuario cuando el pH del respectivo reactor se encuentre fuera del rango establecido por el.

Para la página pH1 específicamente, el valor de pH sensado y el valor del *set-point* establecido para el reactor metanogénico se pueden ver en cualquier momento en una *gráfica* de pH vs. Tiempo (ver figura E.2).

- **Página CT y CpH:** estas páginas se diseñaron para para que el usuario opere el control de temperatura y pH, en el reactor metanogénico. En ambas se puede encontrar un *ring dialog* donde se selecciona, mediante un menú desplegable el tipo de control que se desea realizar en el lazo de temperatura y/o de pH. Las opciones son control **on-off, P, PI y PID**. Cada opción de control tiene sus parámetros correspondientes que se activan cuando el usuario escoge dicha opción como tipo de control, inactivando de inmediato los parámetros propios de las otras opciones; el usuario entonces puede modificar estos parámetros según lo requiera.

En el caso particular de la página CT, para el control de la temperatura, aparece otro *ring dialog* donde se puede elegir del menú desplegable, la variable que será comparada con el *set-point*, entre T1, T2, T3 y Tprom (promedio algebraico entre T1, T2, T3). Esta opción no la tiene la página CpH. Otros elementos que se pueden encontrar en ambas páginas son un *indicador numérico* para conocer el valor de la variable medida, en cada caso, sin necesidad de cambiar de página; un *control numérico* para establecer o modificar el valor del *set-point*, dos *indicadores numéricos* más, uno que muestra el porcentaje de desviación de la variable medida respecto al *set-point* y otro que da a conocer la respuesta del tipo de controlador seleccionado en porcentaje de ancho de pulso.

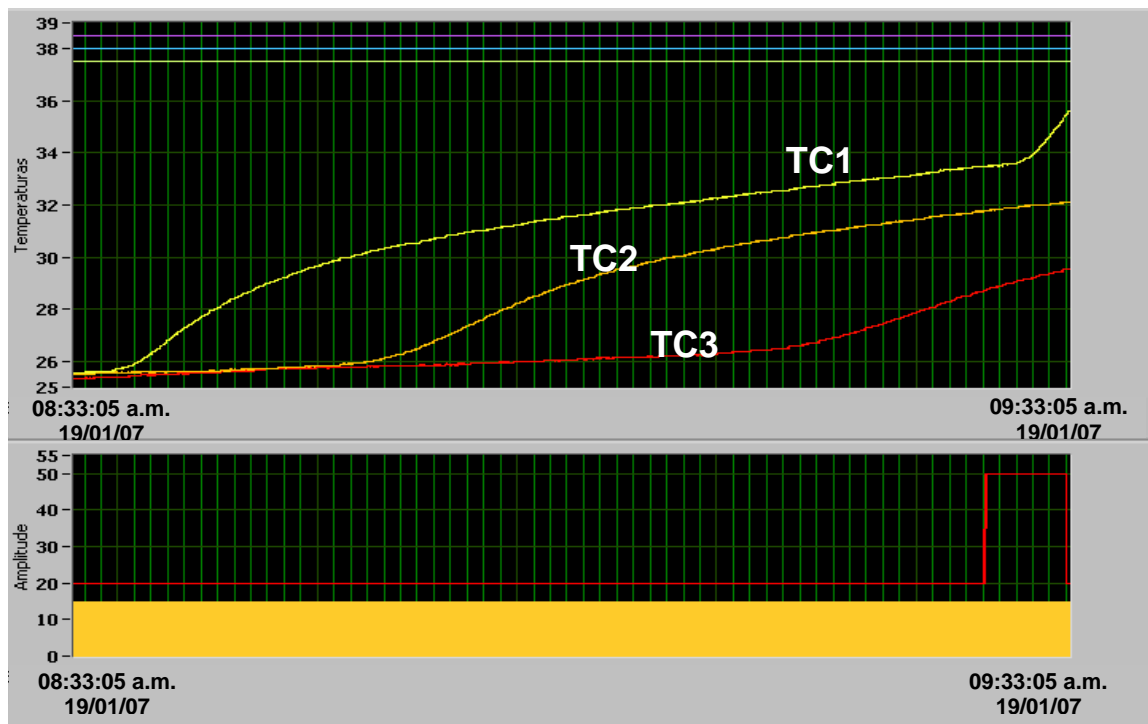
La opción *activar salida* es un switch con el que se habilita o deshabilita la salida de la señal generada por el sistema de control hacia el módulo de salida FP-AO-200. Aparece también un LED verde que se enciende cuando el relé correspondiente suministra potencia al elemento final de control del lazo respectivo de temperatura y/o pH (ver figura E.3)

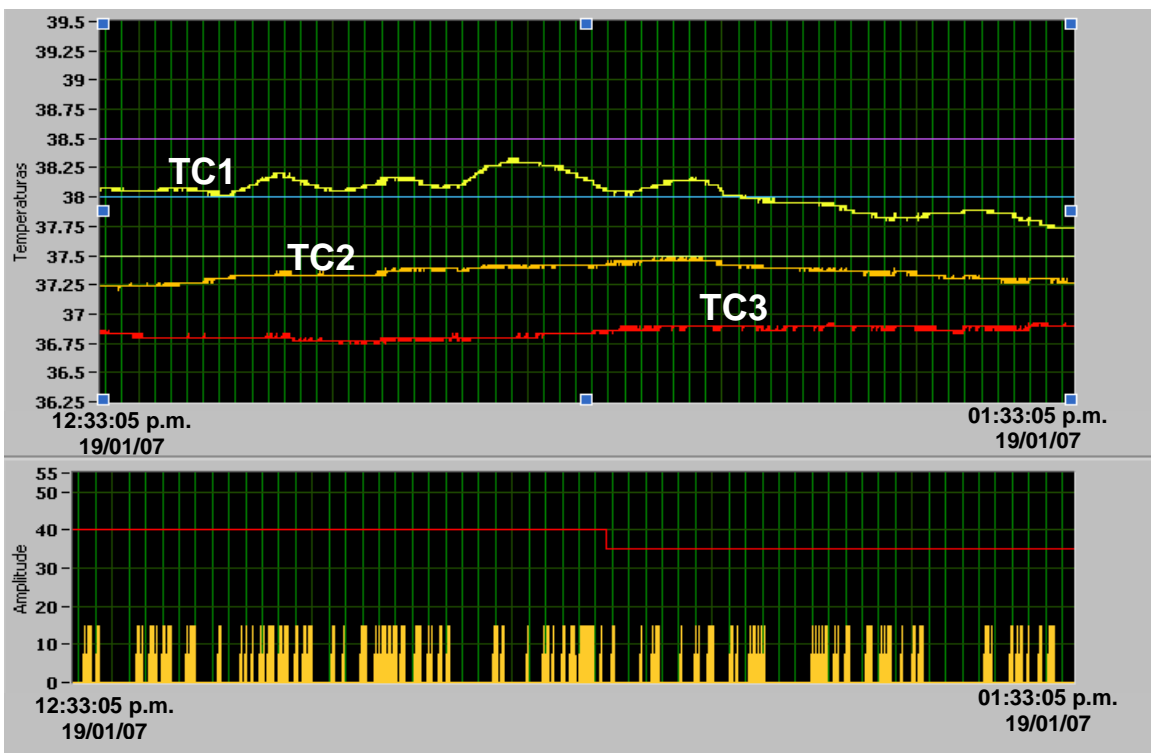
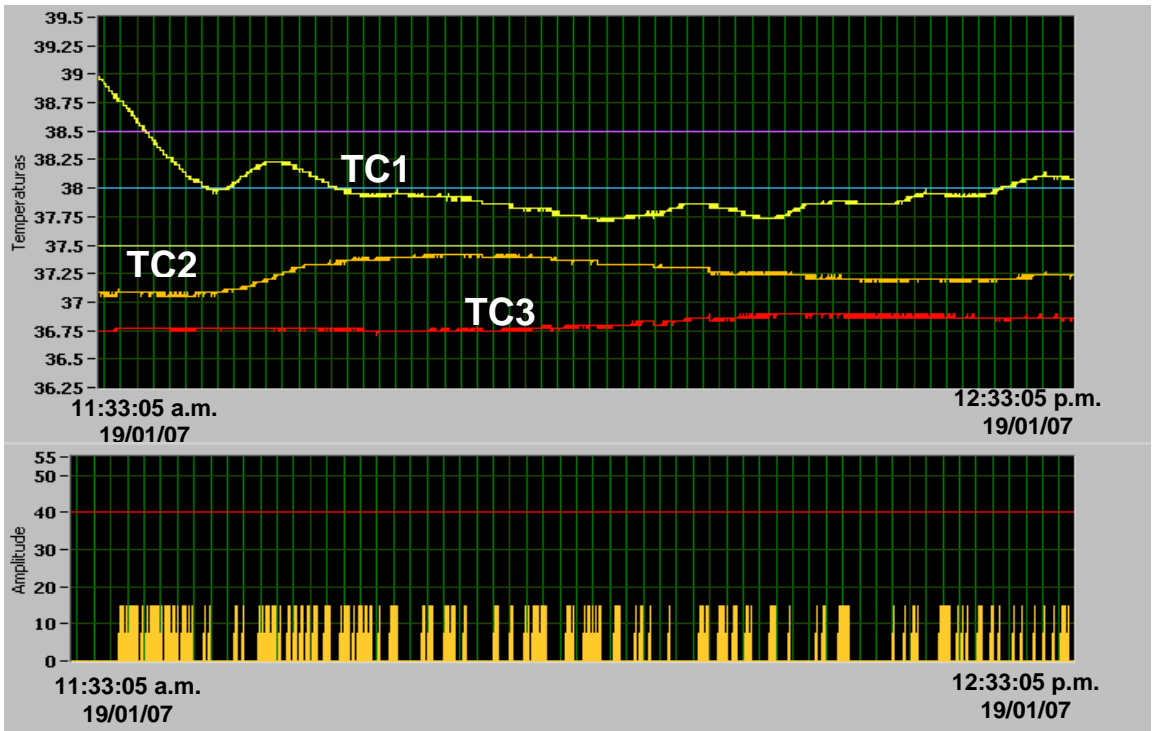
- **Página de PG:** aquí se puede ver un esquema general de la instrumentación implicada en ambos lazos de control, el de temperatura y el de pH, del sistema metanogénico. La figura muestra la ubicación de los sensores en la columna de digestión y su correspondiente lectura en tiempo real mediante indicadores. Igualmente, un par de LEDs verdes señalan si el elemento último de control, resistencia de calentamiento y/o bomba de diafragma, están encendidas o apagadas (ver figura E.4).

### 3.2 RESPUESTA DEL SISTEMA AL CONTROL DE TEMPERATURA

En las siguientes figuras se puede seguir el comportamiento de la temperatura en tres zonas distintas del reactor, donde están localizadas las tres termocuplas TC1, TC2 y TC3, nótese que hay cambios en  $\mu_D$ . Se utilizó agua como fluido de prueba con una temperatura inicial de 25,5 °C, un caudal de alimento fue 1 litro/ día y una relación de recirculación fue de 150. Se utilizó el tipo de controlador on-off y el *set-point* (línea azul) fue de 38 °C, la variable que se compara con el *set-point* es TC1. El periodo de la señal de salida se estableció como 5 segundos y el ancho de pulso 1 segundo, lo que equivale a un  $\mu_D$  de 20%.

Figura 8. Comportamiento de la temperatura del sistema en lazo cerrado





Fuente: Autores

La línea roja de la gráfica inferior de cada figura indica el valor de  $\mu_D$  en porcentaje y la amarilla indica encendido de la resistencia (encendido en un valor de 15 y apagado en un valor de 0). El agua se empieza a calentar desde 25,5 °C hasta alcanzar el punto de control. En la última figura se puede observar cómo el controlador logra mantener la temperatura en un valor cercano al *set-point*, disminuyéndose las desviaciones gracias a la estrategia implementada.

## CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó un sistema de monitoreo y control de pH y temperatura con sensores en línea, un dispositivo de alta tecnología para adquisición de datos y control, y un ordenador para almacenar y procesar datos de estas variables.

La combinación de las estrategias de control por retroalimentación y proporcional al tiempo utilizadas en este trabajo permite reducir las desviaciones respecto al punto de control a  $\pm 0,1$  °C para la temperatura y a  $\pm 0,25$  para el pH, aplicando en ambos casos el tipo de controlador PID.

La implementación de la técnica de control proporcional al tiempo elimina la necesidad de adquirir otro tipo de interfaz de potencia, generalmente más costosa, y permite el uso de los controladores *P*, *PI* y *PID* que proporcionan una regulación más fina que el control convencional *on-off*.

Los sistemas de digestión anaerobia en dos etapas, con herramientas para monitoreo y control de variables requieren una inversión inicial elevada debido, principalmente, a los altos precios de la instrumentación. Para este sistema en particular, los costos de instrumentación representaron el 66,36% del total de la inversión, con tan solo un 33,64% restante para el equipo básico.

Fue posible el desarrollo de un sistema para medición del volumen de biogás producido en el reactor metanogénico con elementos locales de fácil consecución y bajo costo.

## **RECOMENDACIONES**

Para trabajos posteriores se plantea la implementación de un sistema de control de nivel en el reactor, de manera que la altura del nivel del líquido se pueda establecer y mantener de modo automático en un punto de control conveniente para la operación.

La escasez de instrumentación, de fabricación nacional, para monitoreo y control de procesos hace evidente la necesidad de promover el desarrollo de diseños de este tipo de dispositivos en el país.

## BIBLIOGRAFÍA

1. COVÉDIC, Marc. Circuitos integrados para tiristores y triacs. México: Alfaomega. p. 22-28.
2. DAVIS, Enrique. Tutorial Básico para utilizar *Measurement & Automation de National Instruments* con *LabVIEW5.1*. Mérida, Noviembre del 2000
3. FILHO, Rubens y DE ASSIS, Adilson. Soft sensors development for on-line bioreactor state estimation. En: *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 24 (2000); p. 1099-1103.
4. GHOSH, S. *et al.* Pilot-scale gasification of MSW by high-rate and two-phase anaerobic digestion. En: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ANAEROBIC DIGESTION SOLID WASTE. (1999: Barcelona). Memorias del II Simposio Internacional de Digestión Anaerobia de Residuos Sólidos. Vol. 1. Barcelona: 1999. p. 83-90.
5. LUYBEN, William L. Process modeling, simulation and control for chemical engineers. New York: Mc Graw-Hill. 1973. capítulos 6 y 7.
6. MURRIL, Paul W. automatic control of process, Intext. Scranton, Pa. 1967. Capítulos 4, y 5.
7. OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de control moderna. 3a ed. México: Prentice Hall. 1998. p. 211, 213-177.
8. PAVAN, P. *et al.* Two-phase anaerobic digestion of source-sorted OF MSW: performance and kinetic study. En: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ANAEROBIC DIGESTION SOLID WASTE. (1999: Barcelona). Memorias del II Simposio Internacional de Digestión Anaerobia de Residuos Sólidos. Vol. 1. Barcelona, 1999. p. 91-98.

9. RITTMANN, Bruce E. y McCARTY, Perry L. *Biotecnología del Medio Ambiente Principios y Aplicaciones*. España: McGraw-Hill. 2001. p. 161, 559, 285-286.
10. RYHINER, G. I. *et al.* Adaptive on-line optimal control of bioreactors: application to anaerobic degradation. En: *Journal of Biotechnology*. Vol. 22, No 1 (jun. 1992); p. 89-105.
11. SCENNA, N. J. *et al.* Modelado, simulación y optimización de procesos químicos. 1999. p. 697- 698.
12. VANDEVIVERE, P., DE BAERE, L. y VERSTRAETE, W. Types of Anaerobic Digesters for Solid Wastes. En: *Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes biogas*. Hardback- Publication. p. 111-140.

## ANEXOS

### ANEXO A. CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DE EQUIPOS

#### DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR R-1

Los siguientes son datos iniciales:

R	10	Relación de recirculación
Q <sub>o</sub>	1 l/d	Caudal de alimento fresco
S <sub>o</sub>	40000 mgSS Ac/l	Concentración del sustrato

Los siguientes son valores típicos para la etapa metanogénica de la digestión anaerobia:

$\eta_{DIS}$	0,95	Eficiencia fraccional típica de remoción de sustrato <sup>(9)</sup> .
$\epsilon$	0,73	Fracción de vacíos típica del empaque <sup>(9)</sup> .
$\eta_{SEG}$	4	Factor de seguridad para el tiempo de retención de sólidos típico <sup>(9)</sup> .

Tabla A.1. Parámetros de los microorganismos limitantes del proceso

Y	0,035 g VSS <sub>a</sub> /g Ac	rendimiento real de síntesis de células
q'	8,4 g Ac/g VSS <sub>a</sub> .d <sup>-1</sup>	Máxima tasa de utilización específica del sustrato
$\mu'$	0,3 d <sup>-1</sup>	Máxima tasa de crecimiento específico
K	400 mg Ac/l	Concentración sustrato a la mitad del máximo crecimiento
b	0,03 d <sup>-1</sup>	tasa de agotamiento endógeno
X <sub>T</sub>	4000 mg/l	Concentración de sólidos en suspensión. Típica.

Fuente: RITTMANN, Bruce E. y McCARTY, Perry L. Biotecnología del Medio Ambiente Principios y Aplicaciones. McGraw-Hill. España. 2001

Concentración del sustrato en el efluente:

$$S = S_o \cdot (1 - \eta_{DIS}) = 2000 \text{ mg Ac/l}$$

$$\sigma = (1 + R) \cdot \ln\left(\frac{S_0 + R \cdot S}{(1 + R) \cdot S}\right) = 4.79 \text{ adimensional}$$

Tiempo de retención de sólidos suspendidos:

$$\theta_x = \left(\frac{\hat{q} \cdot Y \cdot (S_0 - S)}{(S_0 - S) + \sigma \cdot K}\right)^{-1} = 4,00 \text{ días}$$

Tiempo de retención de sólidos suspendidos para el diseño:

$$\theta_{XDIS} = \eta_{SEG} \cdot \theta_x = 16,01 \text{ días}$$

Fracción de biomasa activa:

$$W_{XA} = \frac{1}{1 + b \cdot \theta_{XDIS}} = 0,675$$

Concentración de la biomasa activa y de la biomasa inerte:

$$X_A = W_{XA} \cdot X_T = 2702,28 \text{ mgSS/l}$$

$$X_i = 1 - X_A = 1297,72 \text{ mgSS/l}$$

Tiempo de detención hidráulico:

$$\theta = \frac{\theta_x}{X_A} \left(\frac{Y \cdot (S_0 - S)}{1 + b \cdot \theta_x}\right) = 5.32 \text{ días}$$

$$\text{Volumen del reactor: } V_{RT} = \frac{Q_0 \cdot \theta}{\varepsilon} = 7.096 \text{ litros}$$

Para evitar problemas con un reactor muy largo, la longitud escogida fue de 100 cm.

$$L = 100 \text{ cm}$$

Área transversal del reactor

$$A = \frac{V}{L} = 70.97 \text{ cm}^2$$

Diámetro del reactor

$$D = \left(\frac{4 \cdot A}{\pi}\right)^{0.5} = 9.51 \text{ cm}$$

Las dimensiones reales del cuerpo del reactor, son:

$$L = 100.7 \text{ cm}$$

$$D = 9.7 \text{ cm}$$

Para un volumen de  $V = 7.441$  litros

### DIMENSIONAMIENTO DEL DECANTADOR SECUNDARIO DEL REACTOR

Con el propósito de remover la biomasa y sólidos suspendidos del reactor, se diseñó un decantador secundario a partir de los datos suministrados:

Datos iniciales:

$Q_0$  11 l/d Caudal de alimento

$X_i$  1297.7 mgSS/l Concentración de sólidos suspendidos

Tabla A.2. Parámetros de diseño habituales para un sedimentador secundario

CS	2 m/d	Carga superficial
$CSs_{LIM}$	23 Kg/dm <sup>2</sup>	Carga de sólidos
$CRV_{LIM}$	2.2 l/ms	Carga de rebose en el vertedero
TRH	3.7 h	tiempo de retención

Fuente: RITTMANN, Bruce E. y McCARTY, Perry L. Biotecnología del Medio Ambiente Principios y Aplicaciones. McGraw-Hill. España. 2001

Área de la sección transversal del decantador:  $A = Q_0 / CS = 55 \text{ cm}^2$

Diámetro del decantador:  $D = \left( \frac{4 \cdot A}{\pi} \right)^{0.5} = 8.4 \text{ cm}$

Carga de rebose sobre el vertedero (debe ser menor que  $CRV_{LIM}$ ).

$$CRV = \left( \frac{Q_0}{L_v} \right) = 2.54 \cdot 10^{-05} \text{ l/s.m} \leq CRV_{LIM}$$

Carga de sólidos (debe ser menor que  $CSs_{LIM}$ ):  $CSs = \left( \frac{Q_0 \cdot X_i}{A} \right) = 2.59 \text{ Kg/d.m}^2 \leq CSs_{LIM}$

Como se observa el decantador cumple con las restricciones de diseño.

Con  $TRH_{MAX} = 3.7$  horas

$$V = Q_0 \cdot TRH = 1.7 \text{ litros}$$

Con este volumen y el área calculada, la altura del decantador completamente cilíndrico sería de 30.8 cm.

Para efectos de un fácil sedimentación de sólidos el sedimentador se diseño con un fondo cónico de pendiente muy inclinada, de volumen 1,7 litros. Lo conforman dos partes una cilíndrica y una cónica de 15 y 19 cm de alto respectivamente.

La eficiencia de remoción de sólidos de un decantador depende fundamentalmente de la concentración de sólidos del afluente y en menor proporción de la carga superficial. La eficiencia para este sedimentador esta dada por:

Eficiencia porcentual de remoción de sólidos suspendidos

$$E_1 = 95.5 \cdot e^{-\left(\frac{265}{X_i} + 0.0021 \cdot CS\right)} = 77.5 \%$$

Concentración de sólidos en el efluente

$$X_e = X_i \cdot (1 - E_1) = 291.5 \text{ mgSS/l}$$

Esta es la concentración de sólidos es la entrada del siguiente sedimentador.

### **DIMENSIONAMIENTO DEL DECANTADOR SECUNDARIO TKS-1**

Este sedimentador se dimensionó bajo las mismas condiciones de diseño que el decantador del reactor. Pero a diferencia de este, su eficiencia es más baja.

$$E_2 = 95.5 \cdot e^{-\left(\frac{265}{X_e} + 0.0021 \cdot CS\right)} = 38,3 \%$$

Por tanto se espera una concentración de sólidos suspendidos de:

$$X_{sal} = X_e \cdot (1 - E_2) = 179.8 \text{ mgSS/l}$$

## DIMENSIONAMIENTO TANQUE DE ALMACENAMIENTO TK-2

Datos iniciales:

$Q_{BD}$  41.76 l/d Caudal mínimo de la Bomba de diafragma

$\eta_{CC}$  0.2 Fracción del ciclo de carga para encendido de P-2

$\eta_L$  0.2 Fracción de espacio libre en la parte superior del tanque

$\theta_{TK2}$  2 d Tiempo de vaciado de TK-2

$$Q_{BDCC} = \eta_{CC} \cdot Q_{BD} = 8.35 \text{ l/d}$$

$$V_{TK2} = \frac{\theta_{TK2} \cdot Q_{BDCC}}{\eta_L} = 20.88 \text{ l}$$

La relación L/D del tanque se seleccionó como 1.0

$$D = \left( \frac{4 \cdot V}{1.0 \cdot \pi} \right)^{1/3} = 29.8 \text{ cm}$$

$$L = 1.0 \cdot D = 29.8 \text{ cm}$$

Las dimensiones del tanque real son las siguientes:

$$D = 30 \text{ cm}$$

$$L = 30 \text{ cm}$$

$$V = 21.2 \text{ l}$$

## DIMENSIONAMIENTO TANQUE DE RETORNO TK-1

Datos iniciales;

$Q$  1.2 GPM Caudal promedio de entrada al tanque

$\theta_{TK1}$  2 min Tiempo de residencia de TK-1

Caudal en l/d:  $Q(l/d) = 6540,48$  l/d

Tiempo de residencia en días:  $\theta(d) = 0,00139$  d

Volumen del tanque:  $V_{TK2} = \theta_{TK1} \cdot Q = 9,08$  l

La relación L/D del tanque se seleccionó como 1,5. Para tanques que operan a 0-250 psi L/D < 3 (Process Vessels)

$$D = \left( \frac{4 \cdot V}{1.5 \cdot \pi} \right)^{1/3} = 19,7 \text{ cm}$$

$$L = 1.0 \cdot D = 29,6 \text{ cm}$$

Las dimensiones del tanque real son las siguientes:

$$D = 20 \text{ cm}$$

$$L = 30 \text{ cm}$$

$$V = 9,42 \text{ litros}$$

## **DIMENSIONAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE CALENTAMIENTO**

Para el diseño de la resistencia de abrazadera se tuvo en cuenta como criterio el máximo gradiente de temperatura entre la entrada y la salida del calefactor que se pueda presentar durante la operación. Este, se da durante el arranque del reactor en condiciones de operación termofílica (condición de temperatura mas alta). Se debe tener en cuenta que a medida que el proceso se estabiliza el flujo de calor requerido para calentamiento se hace mucho menor que el flujo total que disipa la resistencia. Para solucionar esto se aplica una técnica denominada *control proporcional al tiempo* mediante el cual se regula la cantidad de flujo de calor que entrega la resistencia.

### **Datos iniciales:**

Qi 11 l/d Caudal promedio de entrada al calentador

$T_o$	25 °C	Temperatura de entrada del líquido
$T$	55 °C	Temperatura de salida del líquido
$\rho$	1.1 g/cm <sup>3</sup>	Densidad del fluido
$C_p$	5.078 J/g.°C	Capacidad calorífica de l mezcla.
$\eta_P$	0.8	Porcentaje de calor transferido hacia el interior de la resistencia de abrazadera. Típico.
$\eta_{DIS}$	5	Factor de diseño para perdida de capacidad de disipación con el tiempo.

Flujo de calor requerido para aumentar en 30 °C la temperatura del fluido con caudal  $Q_i$ .

$$\dot{Q} = \frac{q_o \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T - T_o)}{86.4} = 31.33 \text{ W}$$

Flujo de calor corregido por perdidas:

$$\dot{Q}_p = \frac{\dot{Q}}{\eta_P} = 26,6W$$

Flujo de calor de diseño.

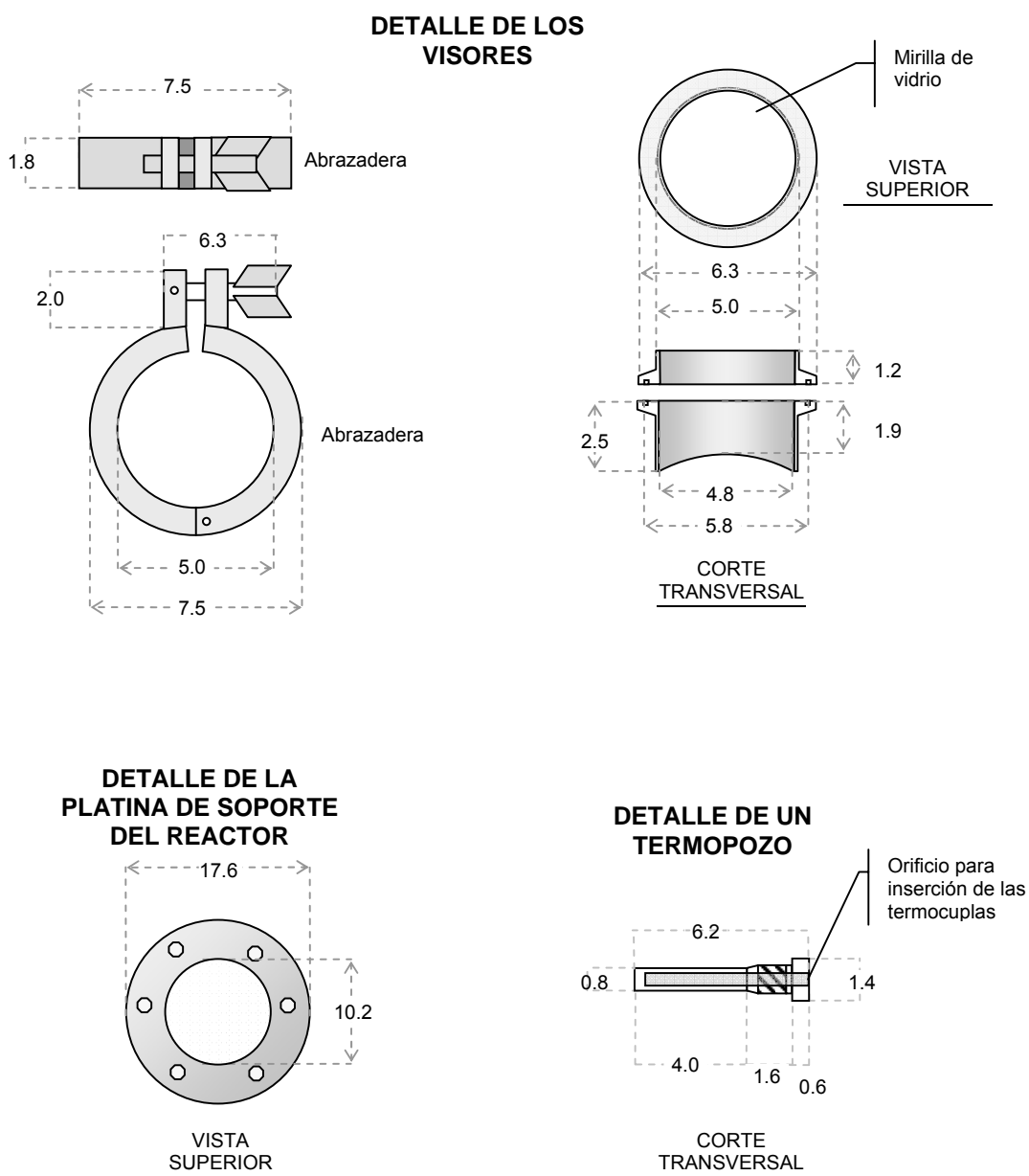
$$\dot{Q}_{DIS} = \eta_{DIS} \cdot \dot{Q}_p = 133.34 \text{ W}$$

La resistencia adquirida tiene la capacidad de disipar 150 W como máximo. Las perdidas se consideran aproximadamente el 20% de su capacidad máxima, según el fabricante.

## **ANEXO B. PLANOS DEL SISTEMA METANOGENICO**



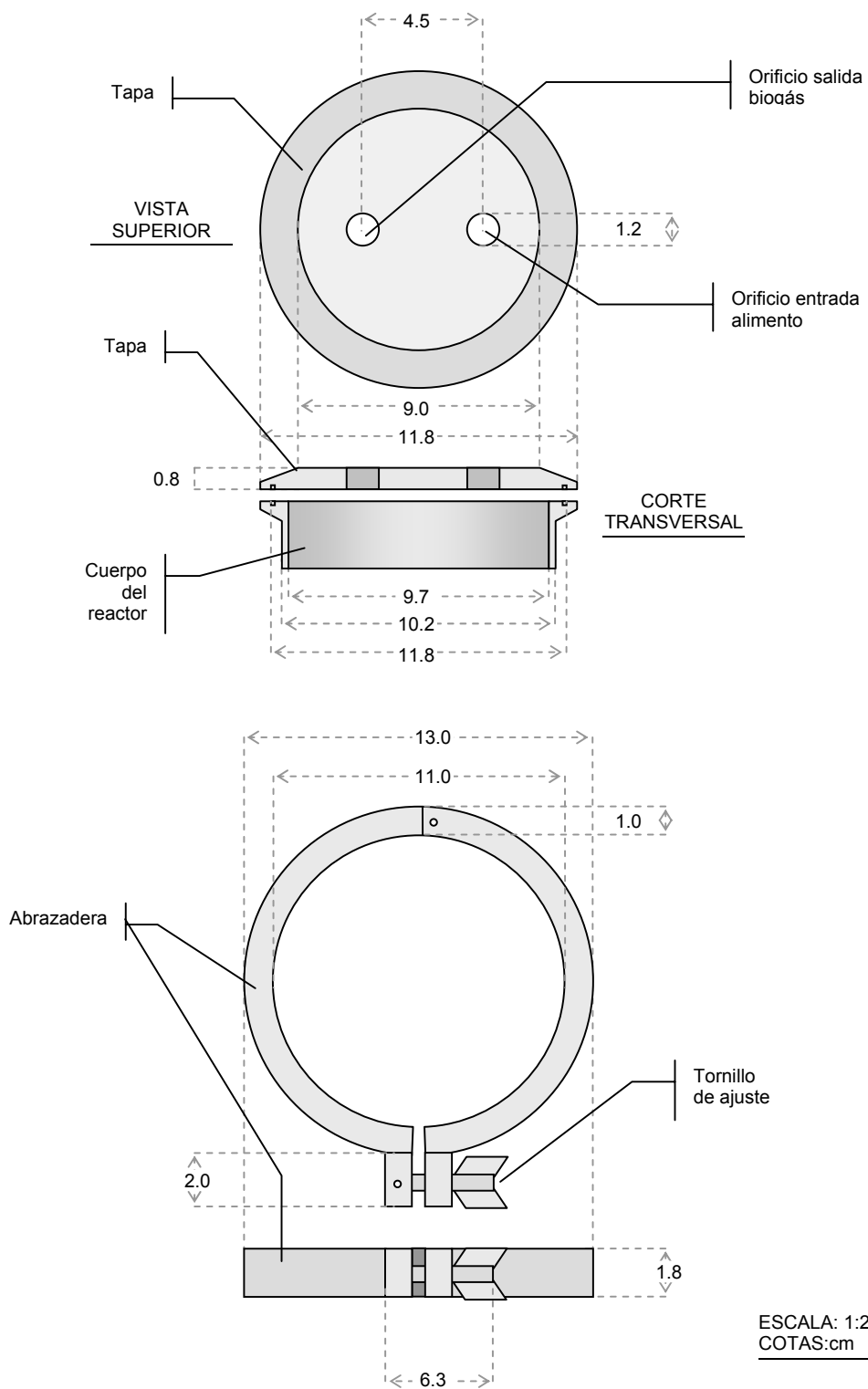
Figura B.2. Detalles de visores, platina y termopozo en el reactor metanogénico



ESCALA: 1:2.5  
COTAS:cm

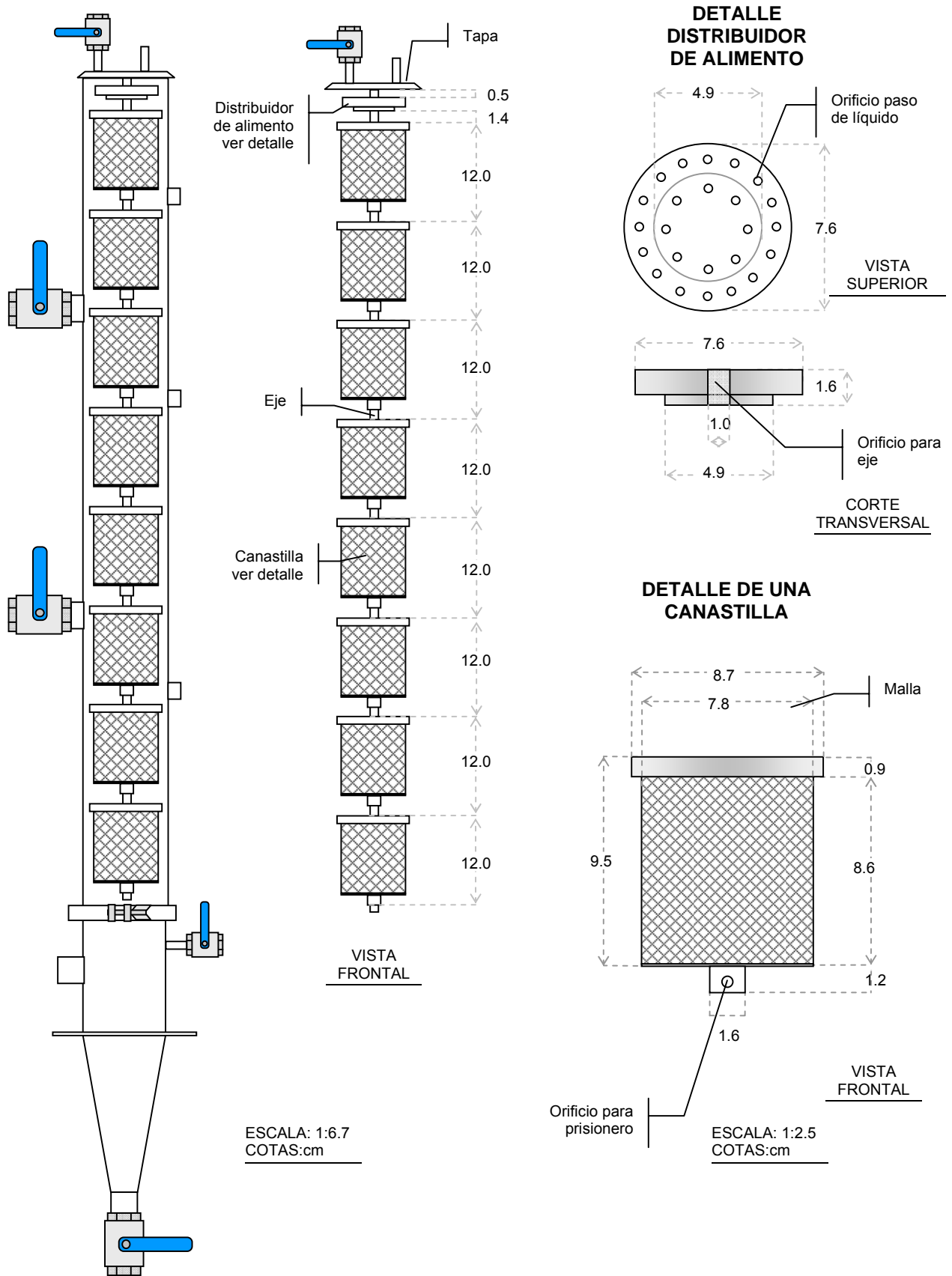
Fuente: Autores

Figura B.3. Detalles del tope del reactor



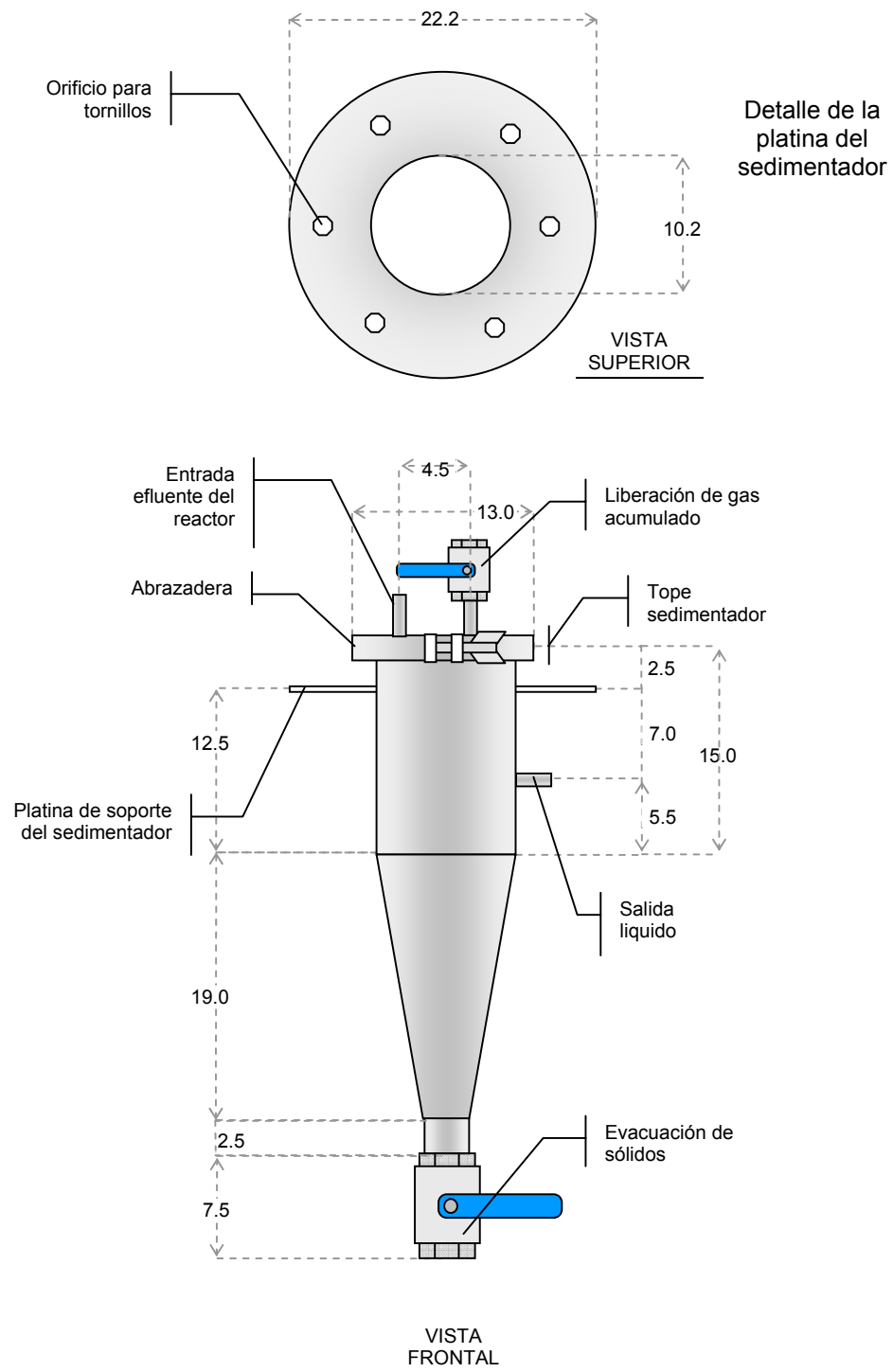
Fuente: Autores

Figura B.4. Arreglo de canastillas y distribuidor del alimento



Fuente: Autores

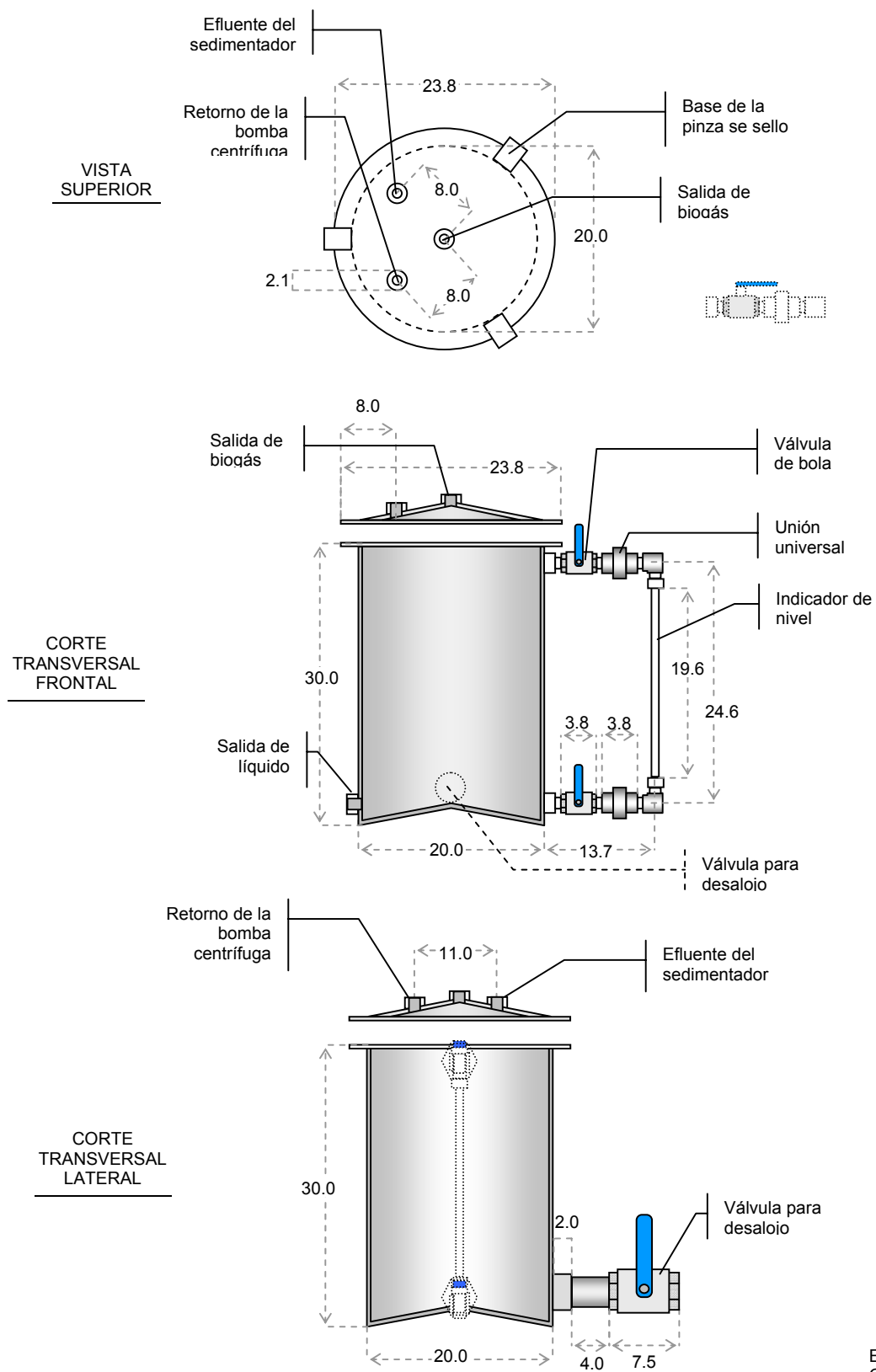
Figura B.5. Sedimentador



ESCALA: 1:1.5  
COTAS:cm

Fuente: Autores

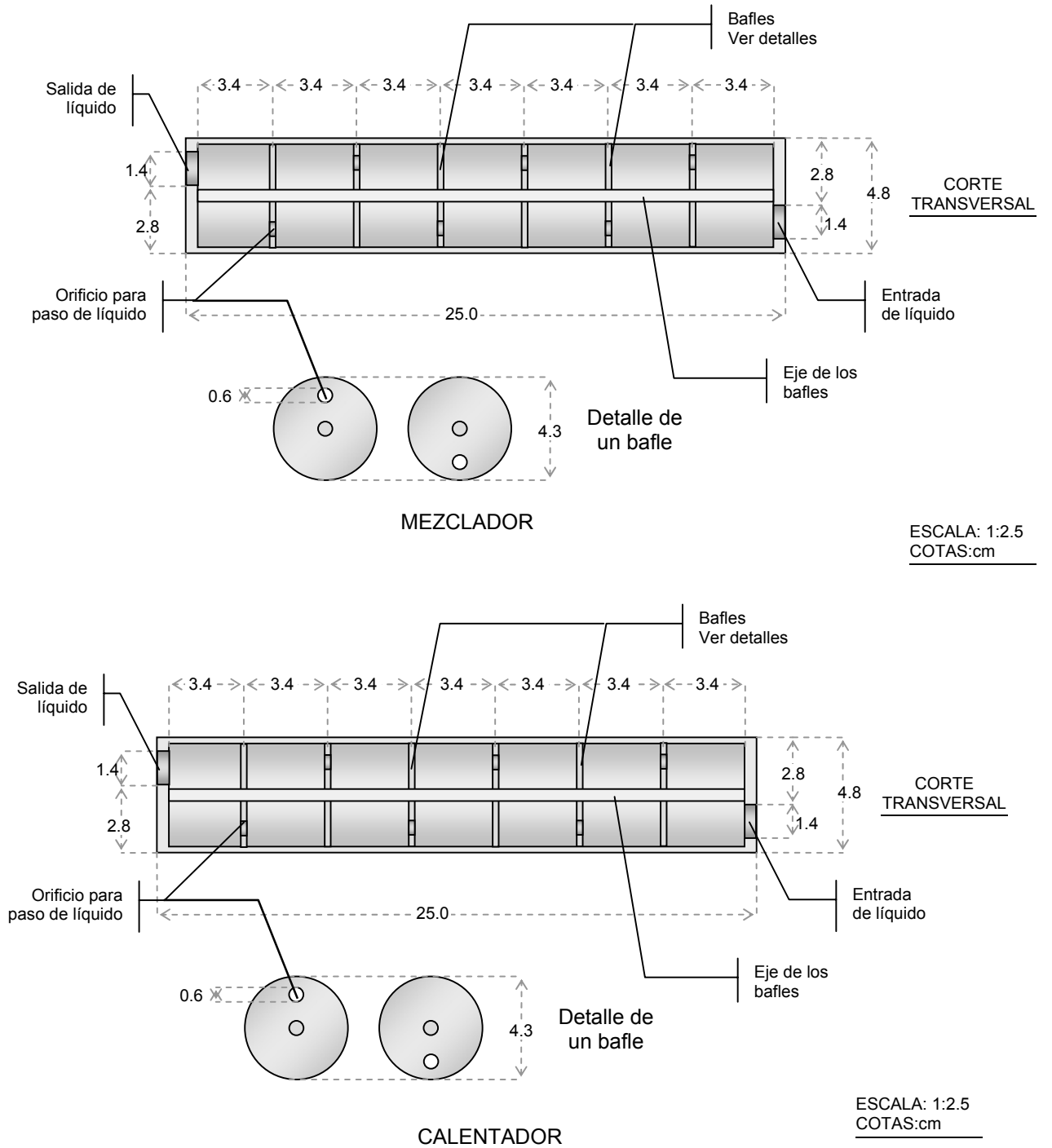
Figura B.6. Tanque de retorno de la bomba centrífuga



ESCALA: 1:6.7  
COTAS:cm

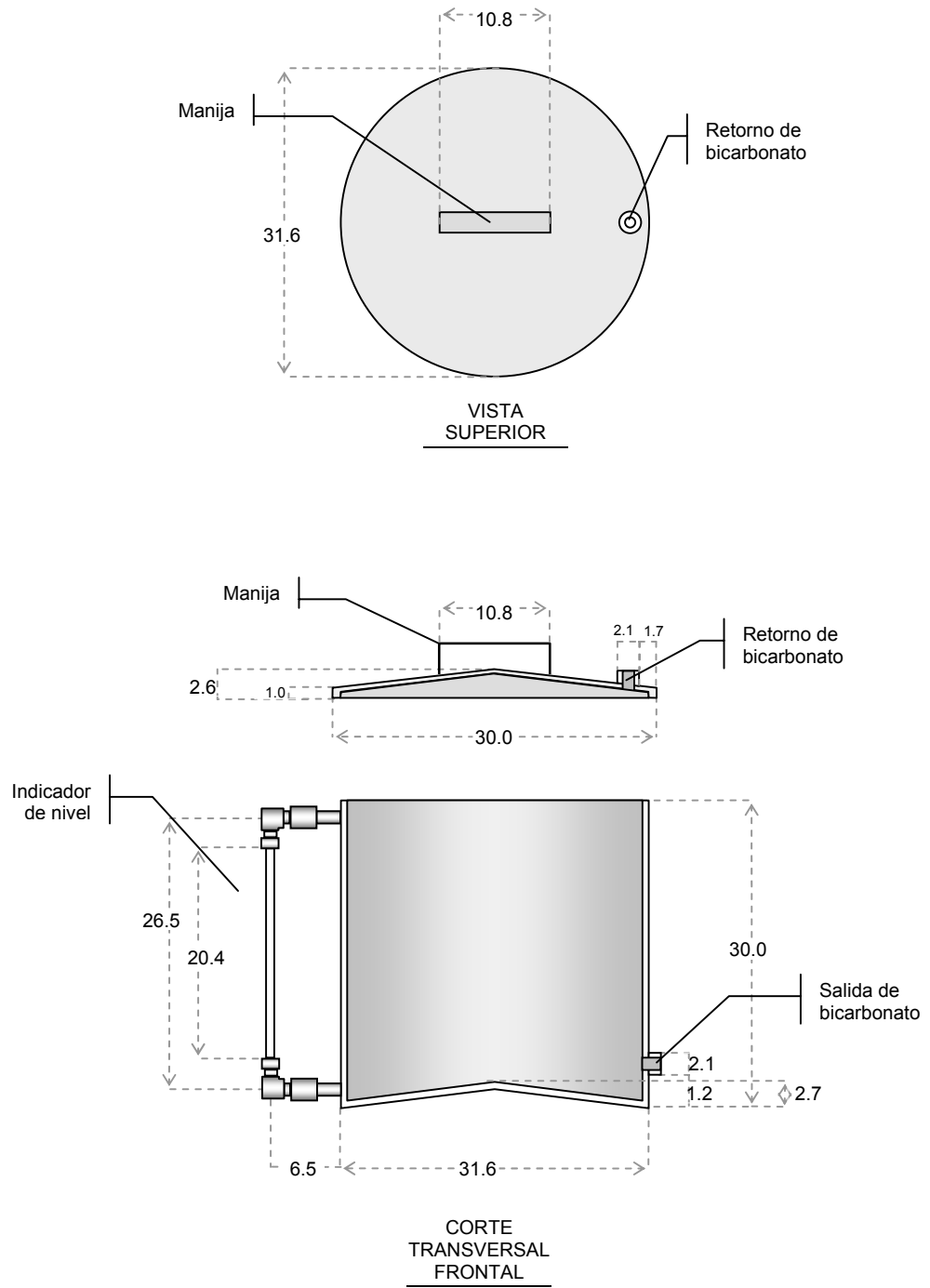
Fuente: Autores

Figura B.7. Detalle mezclador y calentador



Fuente: Autores

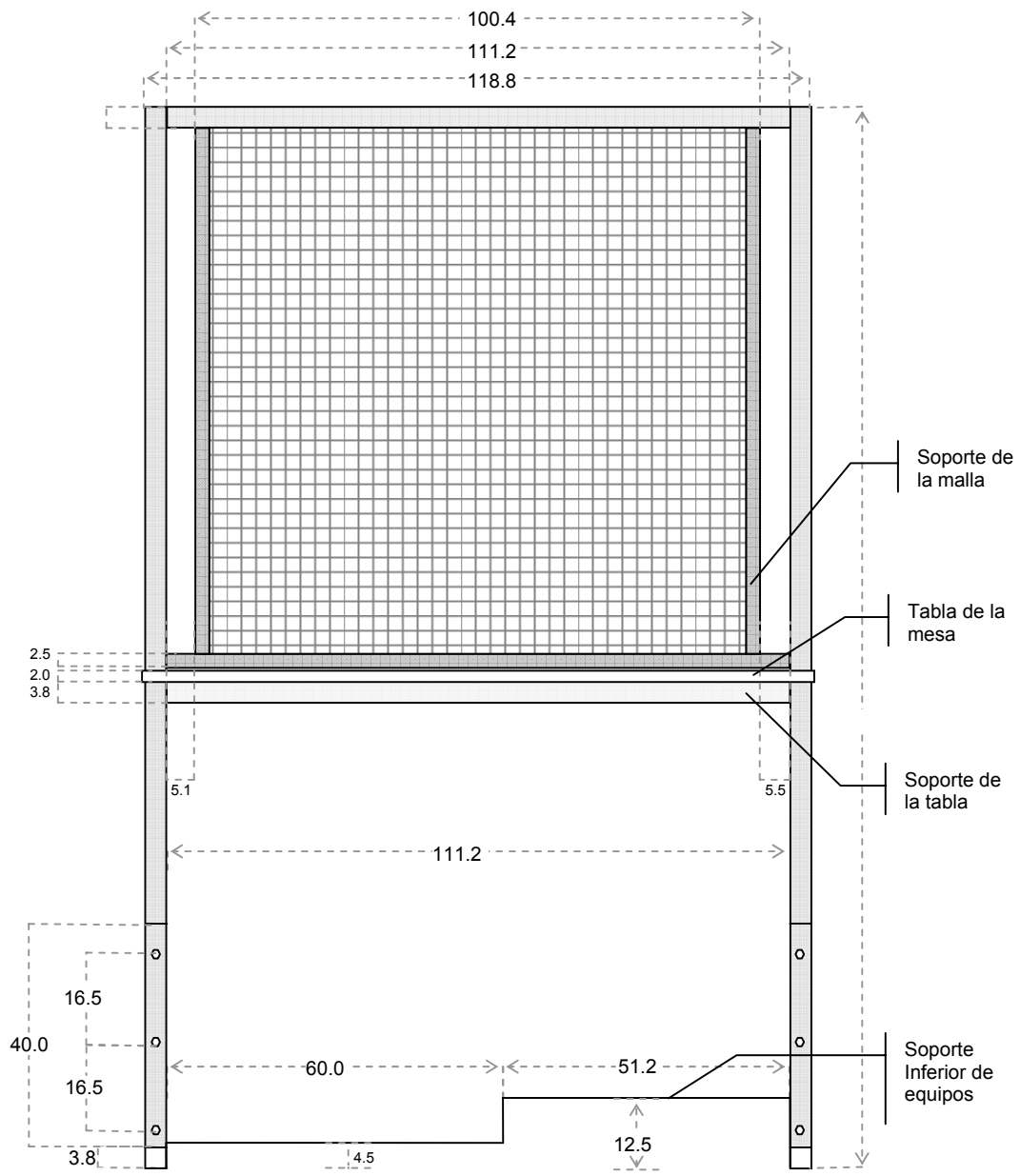
Figura B.8. Tanque para almacenamiento de la solución reguladora de pH



ESCALA: 1:6.7  
COTAS:cm

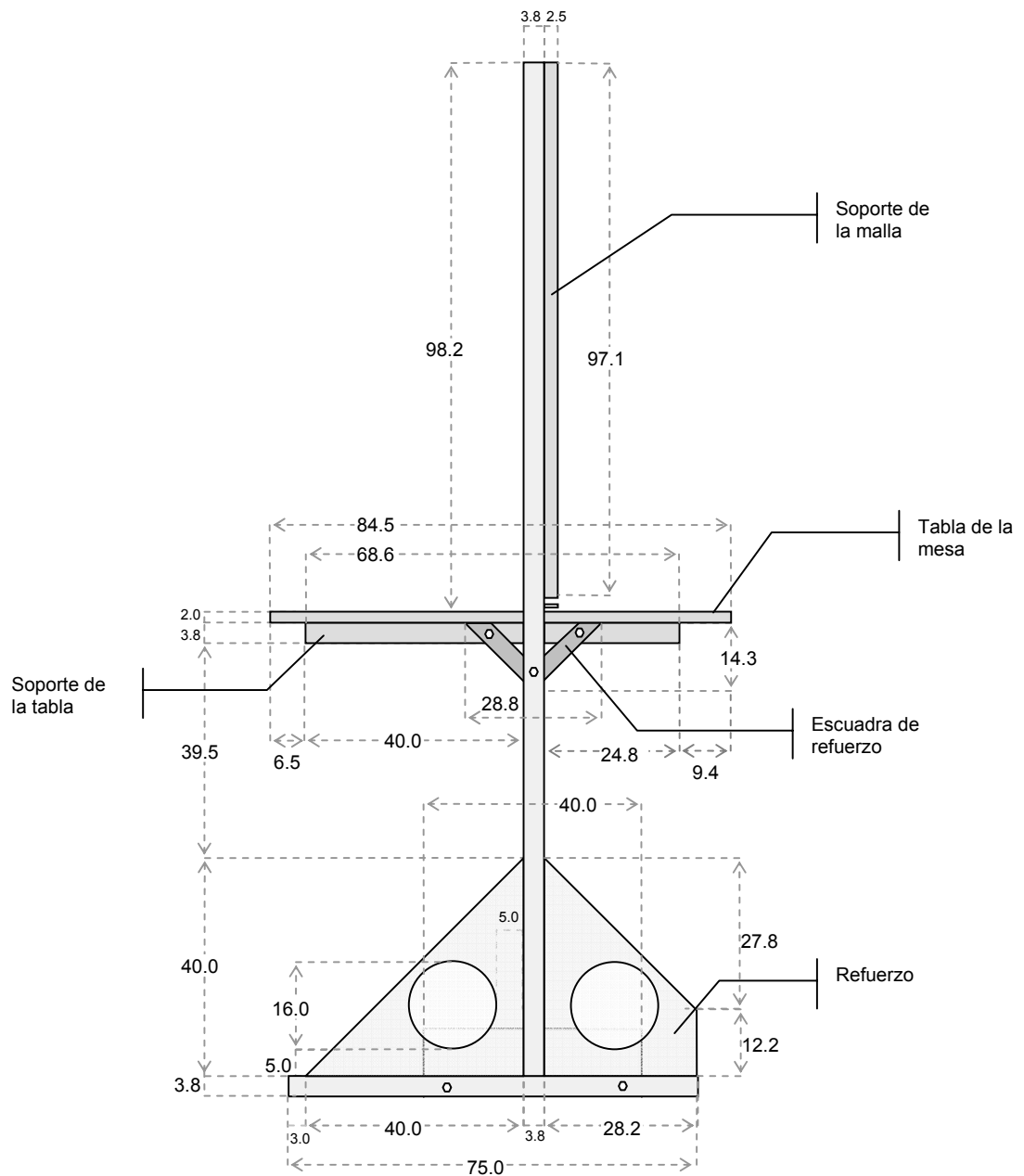
Fuente: Autores

Figura B.9. Estructura de soporte del sistema metanogénico



VISTA  
FRONTAL

ESCALA: 1:12.5  
COTAS:cm

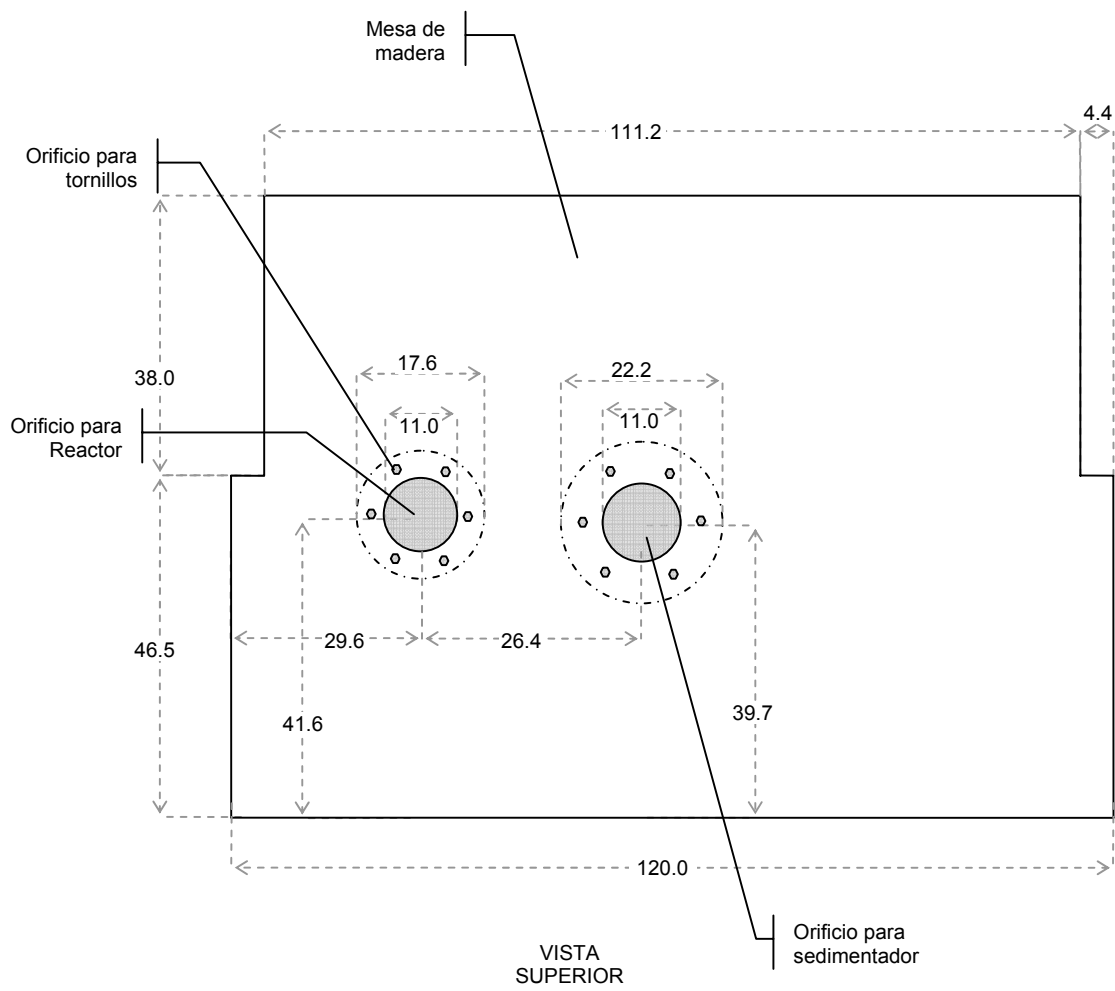


VISTA  
LATERAL IZQ

ESCALA: 1:12.5  
COTAS:cm

Fuente: Autores

Figura B.10. Tabla de la Mesa



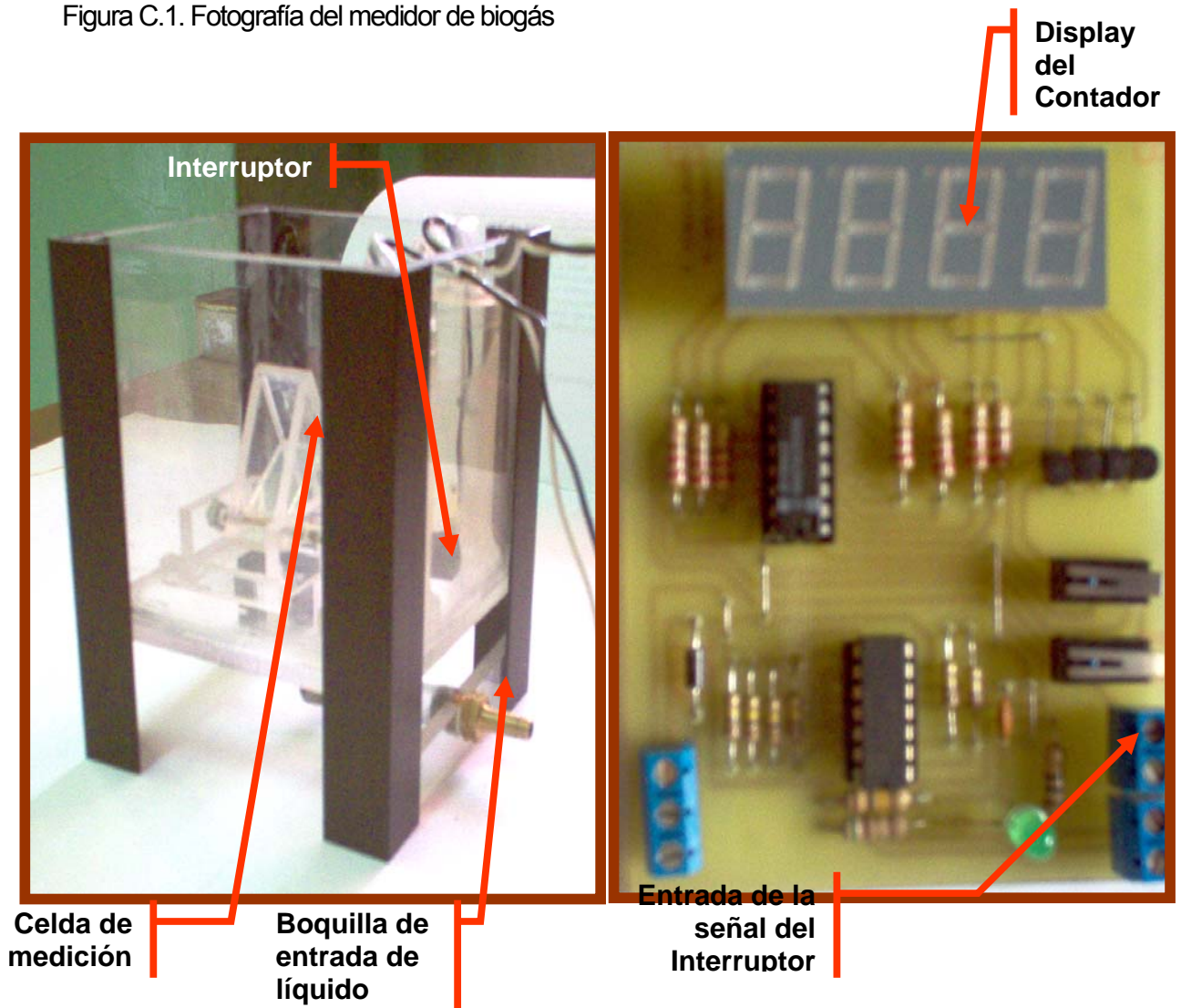
ESCALA: 1:10  
COTAS:cm

Fuente: Autores

## ANEXO C. ESPECIFICACIONES Y FOTOGRAFÍAS DE LOS EQUIPOS

### CORRECCIÓN TEMPERTURA Y PRESIÓN PARA EL MEDIDOR DE BIOGÁS

Figura C.1. Fotografía del medidor de biogás



Fuente: Autores

El volumen de gas depende de la temperatura y la presión atmosférica reales a la hora de hacer las mediciones. Para reportar estas mediciones de volumen a condiciones normales la ecuación de gases ideales es útil para correcciones de presión y temperatura:

$$V_N = V_{med} * \frac{P_a + P_L}{P_N} * \frac{T_N}{T_a} \quad , \quad \text{con:}$$

$V_N$ :	Volumen a condiciones normales	[ml]
$V_{med}$ :	Volumen medido	[ml]
$P_a$ :	Presión atmosférica real	[mbar-absoluta]
$P_L$ :	Presión de la columna de líquido	[mbar]
$P_N$ :	Presión a condiciones normales = 1013,25	[mbar]
$T_N$ :	Temperatura a condiciones normales = 273,15	[Kelvin]
$T_a$ :	Temperatura real del biogas	[Kelvin]

#### EQUIPOS QUE HACEN PARTE DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERTURA

**Termocuplas tipo J.** Tres termocupla tipo J (TC1, TC2, TC3) se instalaron a lo largo del cuerpo del reactor para sensar temperatura en línea. Estas se introducen al reactor dentro de termopozos de acero inoxidable 316 de 6,2 cm. de longitud, acopladas con rosca de 1/4" NPT macho.

**Sistema modular para monitoreo y control FieldPoint.** El sistema modular de Entrada/Salida (E/S) FieldPoint (FP) de National Instruments (NI) para monitoreo, registro y control, está compuesto por un banco de cuatro módulos para esta aplicación en particular: módulo de red FP-1000, módulo de entrada analógico en voltaje o corriente FP-AI-110, módulo de salida analógico en corriente FP-AO-200 y módulo de entrada analógico para termocuplas estándar FP-TC-120. Cada módulo de entrada o salida requiere ir montado sobre una Base Terminal Isotérmica o Universal. Además una fuente de 24 VDC de NI suministra la alimentación de potencia al banco. La comunicación con el ordenador, se hace a través del

puerto serial RS-232, por tanto requiere del correspondiente cable de interfaz. El software de configuración para este sistema FP es el MAX (Measurement & Automation Explorer).

Todos los módulos brindan un puente de distribución de potencia para hacer más fácil la alimentación de sensores o para lazos de corriente externos y cuentan con conexiones del tipo terminales de tornillo. Todos los módulos brindan protección contra sobre voltaje transitorio de 2,300 Vrms entre los canales de entrada y tierra. La Temperatura de operación para todos los módulos está en el rango -40 a 70 °C. Todos los módulos vienen con certificados de calibración trazable expedidos por el NIST (National Institute of Standards and Technology) para asegurar la precisión y fiabilidad de las medidas y el control analógicos.

Figura C.2. Fotografía del sistema modular para monitoreo y control FieldPoint



- 1: Módulo de red FP-1000
- 2: Módulo de salida FP-AO-200
- 3: Módulo de entrada FP-AI-110
- 4: Módulo de termocuplas FP-TC-120
- 5: Fuente de alimentación FP-PS-4

Fuente: Autores

Tabla C.1. Especificaciones módulos de entrada y salida

	FP-AI-110	FP-TC-120	FP-AO-200
Canales	8 entradas en corriente o voltaje	8 entradas diferenciales en voltaje	8 salidas en corriente
Resolución del convertidor	16 bits a 50 o 60 Hz 10 bits a 500 Hz	16 bits	12 bits
Tipo ADC	Delta-sigma	Delta-sigma	
Requerimientos de potencia	350 mW	350 mW	350 mW
Aislamiento Sobrevoltajes continuos	250,0 V <sub>rms</sub>	250,0 V <sub>rms</sub>	No

*Fuente:* Manual de instrucciones para el usuario de NI

Tabla C.2. Rangos de medida de las señales analógicas de entrada y salida para cada módulo

Módulo	Rangos de los canales
FP-AI-110	0-1 V, 0-5 V, 0-10 V, $\pm 60$ mV, $\pm 300$ mV, $\pm 1$ V, $\pm 5$ V, $\pm 10$ V
	0-20 mA, 4-20 mA, $\pm 20$ mA
FP-TC-120	$\pm 25$ , $\pm 50$ , $\pm 100$ , -20 a 80 mV
FP-AO-200	0-20, 4-20 mA

*Fuente:* Manual de instrucciones para el usuario de NI

Tabla C.3. Especificaciones módulo de interfaz en red RS-232

	<b>FP-1000</b>
Conexión con el PC	directa al puerto serial (RS232)
Baudios	300, 1200, 2400, 9600, 38400, 57600, 115200
parámetros de comunicación	1 bit de inicio, 8 bits datos, 1 bit de parada, sin bit de paridad
Rango de la fuente de	11-30 VDC

alimentación	
--------------	--

*Fuente:* Manual de instrucciones para el usuario de NI

Tabla C.4. Especificaciones Fuente de alimentación

	<b>FP-PS-4</b>
Voltaje de entrada	90-264 VAC
Frecuencia	47-63 Hz, monofase
Voltaje de salida	24 VDC
Potencia continua nominal	15 W

*Fuente:* Manual de instrucciones para el usuario de NI

**Resistencia de calentamiento tipo abrazadera.** El objetivo de este dispositivo que se encuentra rodeando al calefactor (que se describe mas adelante), es regular la temperatura dentro del reactor. Esta resistencia es accionada según la decisión del controlador (PC). Sus características son:

Aislamiento:	Asbesto	Diámetro externo:	2"
Longitud:	20 cm	Voltaje:	120 V
Potencia:	150 W		

**Relé de estado sólido.** Este dispositivo sirve como *interfaz de potencia* entre la señal analógica del módulo de salida y la fuente de alimentación de la resistencia de calentamiento / de la bomba de diafragma que trabajan con corriente alterna. El sistema cuenta con dos relés de estado sólido modular para montaje en riel DIN, (uno para el sistema de control de temperatura y otro para el de pH) con disipadores de calor incorporados. Marca OPTEC, modelo TD24A05-D, con las siguientes características:

Corriente de carga:	5 A	Voltaje de línea:	24-240 VAC
Voltaje de control:	4-32 VDC	Semiconductor	Triac

## EQUIPOS QUE HACEN PARTE DEL SISTEMA DE CONTROL DE pH

**Electrodo de pH en línea.** Electrodo para la medición de pH en línea con elemento ATC (Automatic Temperature Compensation) con extremos pelados, para corrección de la lectura del electrodo por cambios en la temperatura. La superficie plana del electrodo no acumula sólidos en suspensión (ver figura D.4). Otras características son:

Cuerpo:	CPVC
Conexión:	3/4" NPT macho
Rango de pH:	0-12
Solución de referencia:	KCl/AgCl
Temperatura máxima:	80 °C
Longitud:	12 cm
Diámetro externo:	2,5 cm
Cable para la transmisión de la señal:	3 metros de largo con conector BNC macho

**Bomba de diafragma.** Bomba de diafragma marca Blue-White, Modelo C-660P.

Flujo máximo (a 60 psi):	17.4	Voltaje:	115 V
Potencia:	45 W	Corriente:	0.45 A

Figura C.3. Fotografías del electrodo de pH y la bomba de diafragma



*Fuente:* Autores

**Caja de controles.** Es una caja metálica de 70 cm de largo, 60 cm de ancho y 30 cm de fondo, cuyo interior aloja un conjunto de dispositivos tales como el sistema modular FieldPoint, relés de estado sólido y elementos de protección (*breakers* y contactores). Todos estos dispositivos están montados en forma ordenada sobre riel DIN de 35 mm y sus cables de conexión van dentro de canaleta ranurada de 4x4 cm. En su exterior se encuentran elementos para maniobra externa (switch de muletilla, switch de llaves), lámparas de señalización y medidores de corriente alterna conocer el rendimiento del motor, las bombas y las resistencias con el tiempo.

Desde esta caja se realiza el encendido y apagado, manual o automático, de diferentes elementos. Tiene alimentación a 220 VAC, para disminuir la carga generada por conexiones adicionales futuras de otros equipos, aunque por el momento todos funcionan a 110 VAC.

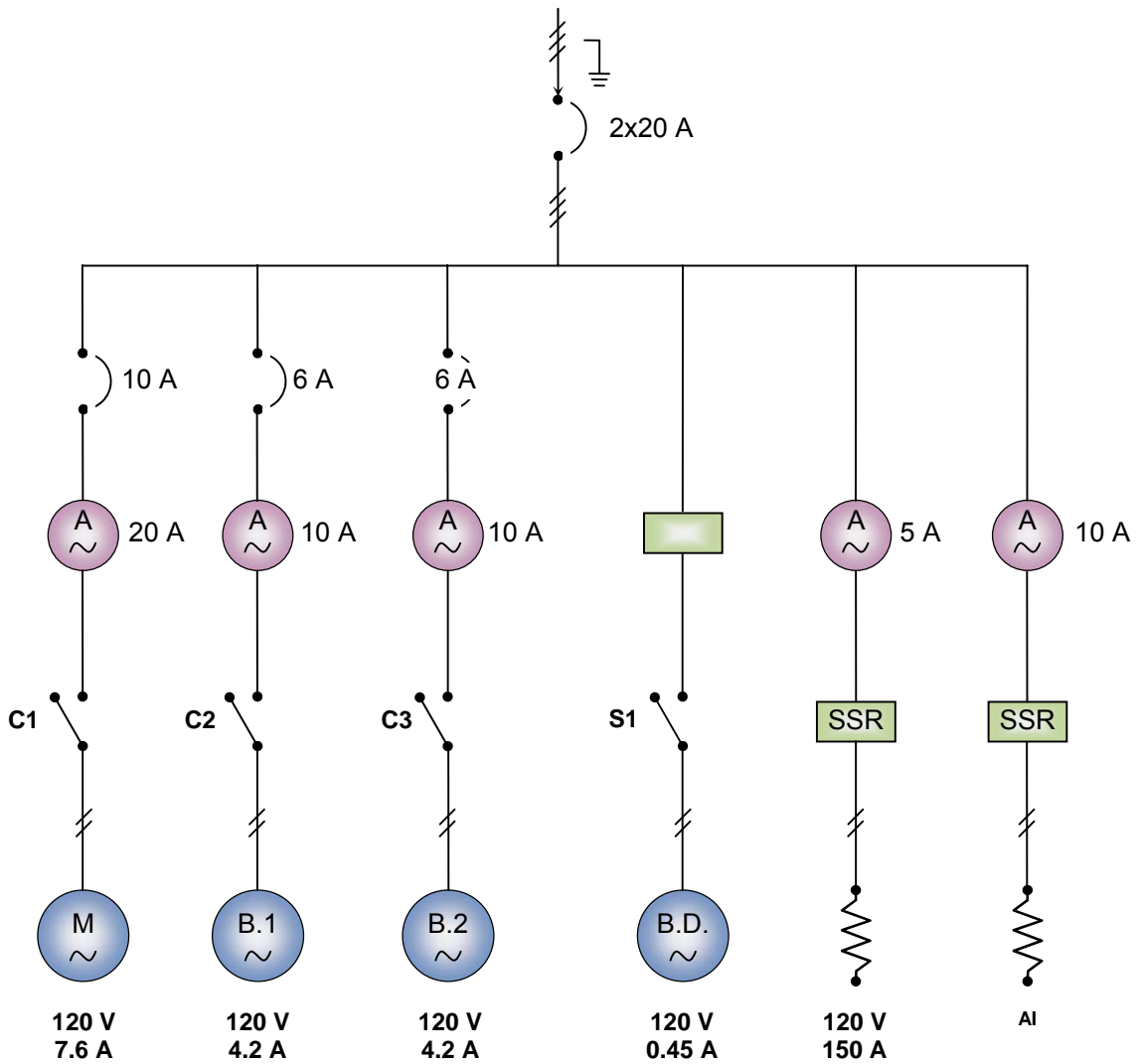
Figura C.4. Fotografía de la caja de control



Fuente: Autores






Figura C.5. Diagrama de potencia de la caja de control (unifilar)



Convenciones:

	Amperímetro		Contactor o switch	M	Motor
	Bomba o motor		Línea trifásica	B1, B2	Bomba centrífugas 1 y 2
	Relé de estado sólido		Línea monofásica	BD	Bomba de diafragma

	Resistencia		Tierra	C1, C2, C3	Contactores 1, 2, 3
	<i>Breaker</i>			S1	<i>Switch</i>

*Fuente:* Técnico Pedro E. Caldas

**Estructura de soporte del sistema.** A partir de las dimensiones estimadas para cada uno de los equipos y de la distribución física de estos dentro del sistema, se diseñó la estructura de soporte. Se construyó una estructura en acero tipo A-36 de 187,3 cm de altura, recubierta con pintura electrostática gris. En la parte inferior de la estructura se ubicó un soporte horizontal (ver figura C.10) sobre el cual se localizan la bomba centrífuga, el tanque de retorno y el sistema de filtros.

A 89 cm del piso se ubicó una tabla de triplex recubierta con fórmica blanca. Esta mesa sirve como soporte para sujetar el reactor metanogénico y el sedimentador (ver figuras B.9 y B.10). Una platina circular soldada alrededor de la zona de sedimentación del reactor ajusta firmemente este equipo a la mesa, con seis tornillos. Otra platina del mismo tipo asegura el sedimentador (ver detalles en figuras B.2 y B.5). Sobre la mesa también se ubicaron el tanque de almacenamiento de la solución reguladora de pH y la caja de controles.

En la parte superior de la estructura se adecuó una malla del mismo tipo de material, sobre la cual el dispositivo mezclador y el calentador se sujetan mediante collarines. El tope del reactor se atomilló al marco superior de la estructura con ayuda de una abrazadera, con el fin de darle mayor estabilidad a este equipo. El panel de rotámetros también está sujeto al marco lateral superior de la estructura.

## OTROS EQUIPOS

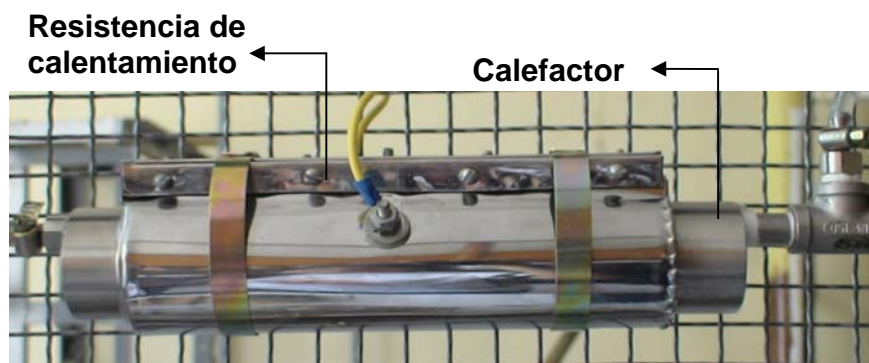
**Calefactor.** Con el propósito de aumentar la superficie de transferencia de energía desde una resistencia de calentamiento hacia el fluido que ingresa al reactor metanogénico (alimento

fresco + líquido recirculado), se diseñó un tubo cilíndrico con un arreglo de 6 baffles internos, a través del cual este fluido circula (ver plano en la figura B.7). Sus características son:

Longitud:	25 cm	Diámetro externo:	4.8 cm
Volumen:	0.348 L	Distancia entre baffles:	3,4 cm
Material:	Acero inoxidable 316		
Conexiones de entrada y salida:	En 1/4" NPT hembra		

Este tramo de tubería está rodeado por una resistencia tipo abrazadera de 150 W. La figura C.6 muestra al dispositivo para calentamiento rodeado por la resistencia.

Figura C.6. Fotografía del sistema de calentamiento



Fuente: Autores

**Tanque de almacenamiento de bicarbonato.** El tanque cilíndrico está construido en cold rolled calibre 16 y recubierto internamente con anticorrosivo epóxico de Sika. Tiene tapa removible y nivel de vidrio; 30 cm de altura, 30 de diámetro externo y 21,2 litros de capacidad (ver planos en la figura B.8). Diseñado para almacenar la solución reguladora de pH. La descarga de este tanque llega por gravedad hasta la succión de la bomba de diafragma. Tiene dos conexiones, una de entrada y otra de salida, en 1/4" NPT hembra.

Figura C.7. Fotografía del tanque de almacenamiento de bicarbonato



*Fuente:* Autores

**Mezclador.** En este dispositivo se lleva a cabo el mezclado de la corriente de recirculación con la solución reguladora de pH. Los fluidos ingresan a un tramo de tubería de 2" de diámetro y circulan por el interior siguiendo un recorrido tortuoso por efecto de 6 baffles soldados a un eje central. Las dimensiones de esta unidad se especifican a continuación (ver planos en la figura B.8.)

Longitud:	25 cm	Diámetro externo:	4.8 cm
Volumen:	0.348 L	Distancia entre baffles:	3,4 cm
Material:		Acero inoxidable 316	
Conexiones de entrada y salida:		En 1/4" NPT hembra	

Figura C.8. Fotografía del dispositivo para mezclado



*Fuente:* Autores

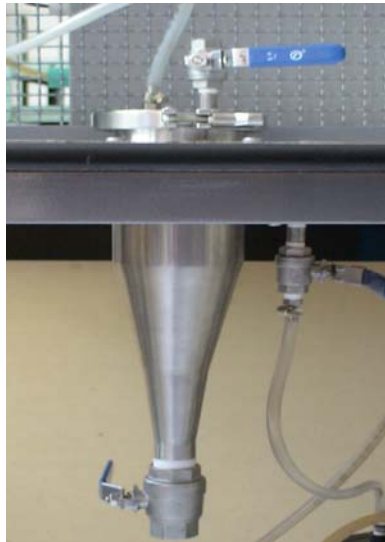
## FOTOGRAFÍAS DE EQUIPOS

Figura C.9. Fotografía del detalle de los visores y canastillas



*Fuente: Autores*

Figura C.10. Fotografía del sedimentador



*Fuente: Autores*

Figura C.11. Fotografía del montaje tanque de retorno-sistema de filtros-bomba centrífuga



*Fuente: Autores*

## ANEXO D. COSTOS DEL SISTEMA METANOGENICO

En esta sección se detallan los costos que se asumieron para el diseño y construcción del sistema de digestión anaerobia para la fase metanogénica planteado en este proyecto.

Tabla D.1. Costos del sistema metanogénico

Descripción	Valor (\$ pesos)	
<b>EQUIPO BASE</b>		
Reactor, sedimentador, sistema de filtros, estructura y accesorios	6 782 400,5	
Tanque de retorno	227 100	
Bomba centrífuga	183 280	
Tanque de almacenamiento	227 100	
Calentador	208 800	
Mezclador	208 800	
<b>TOTAL EQUIPO BASE</b>	<b>7 837 480</b>	
<b>INSTRUMENTACIÓN</b>		
Electrodo de pH	1 219 705	
Sistema FielPoint	9 013 696	
3 Rotámetros	3 120 168	
3 Termocuplas tipo J	59 508	
Resistencia de calentamiento	185 600	
2 Relés de estado sólido	185 600	
Caja de control	740 273	
Material medidor de gas	142 386	
Bomba de diafragma	795 760	
<b>TOTAL INSTRUMENTACIÓN</b>	<b>15 462 696</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>23 300 177</b>	

*Fuente:* Autores

La tendencia a la inestabilidad de la etapa metanogénica en la DA hace que el proceso requiera un sistema de control sofisticado que permita monitorear y controlar los parámetros y las variables importantes de la operación para un desempeño eficiente de los reactores. Esta es una de las razones principales que hace que la inversión inicial requerida para este tipo de sistemas, sea alta. Sin embargo, esta inversión puede ser compensada por una mayor producción global de energía, sin considerar, por supuesto, el beneficio ambiental que supone no verter residuos a cielo abierto o el evitar que se produzcan emisiones incontroladas de gases invernadero.

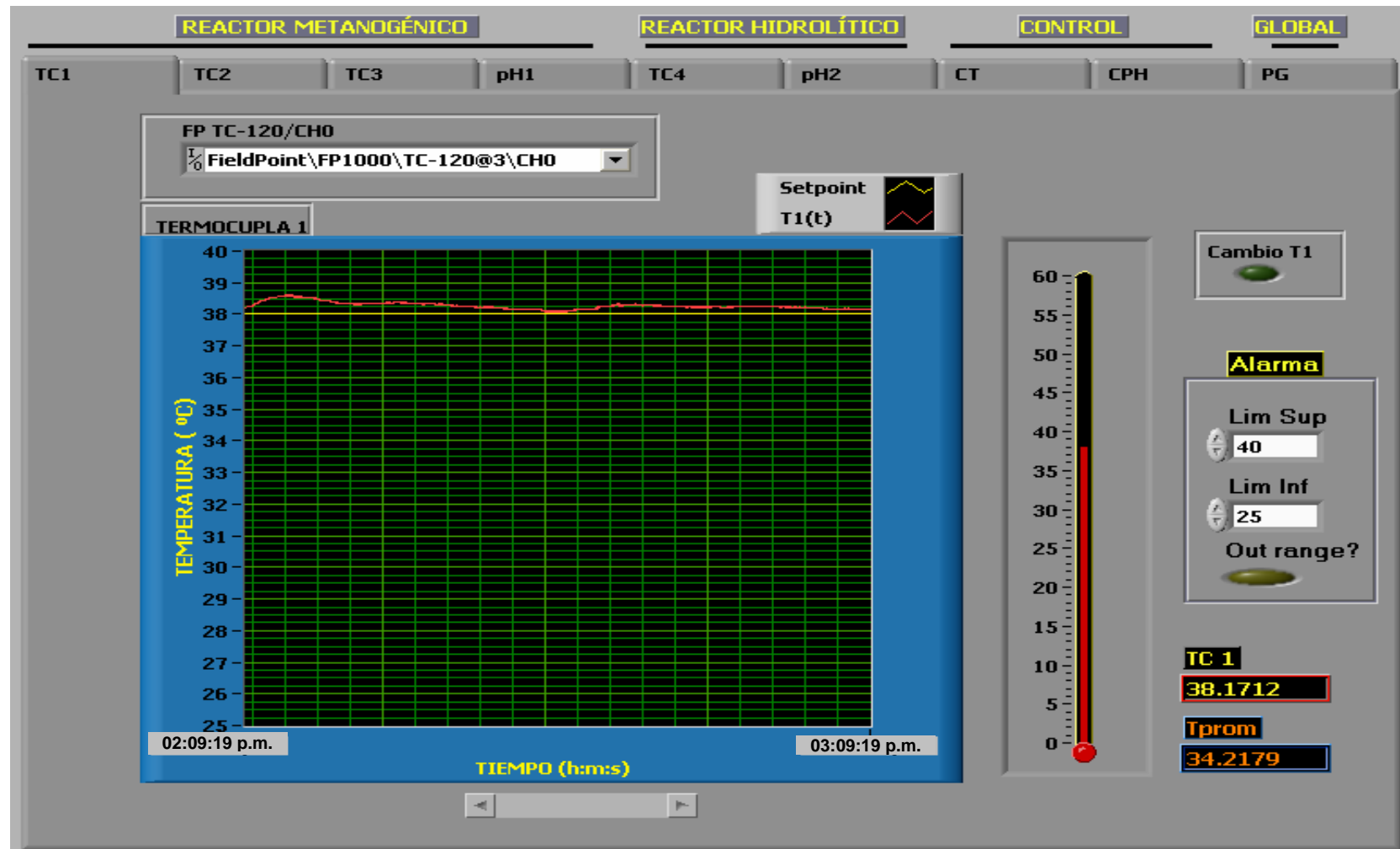
Para este sistema en particular, los costos de instrumentación representaron el 66,36% del total de la inversión, con tan solo un 33,64% restante para el equipo básico.

$$\% \text{ Costo de Instrumentación} = \frac{\text{costo instrumentación}}{\text{costo total}} * 100$$

$$\% \text{ Costo equipo base} = \frac{\text{costo equipo base}}{\text{costo total}} * 100$$

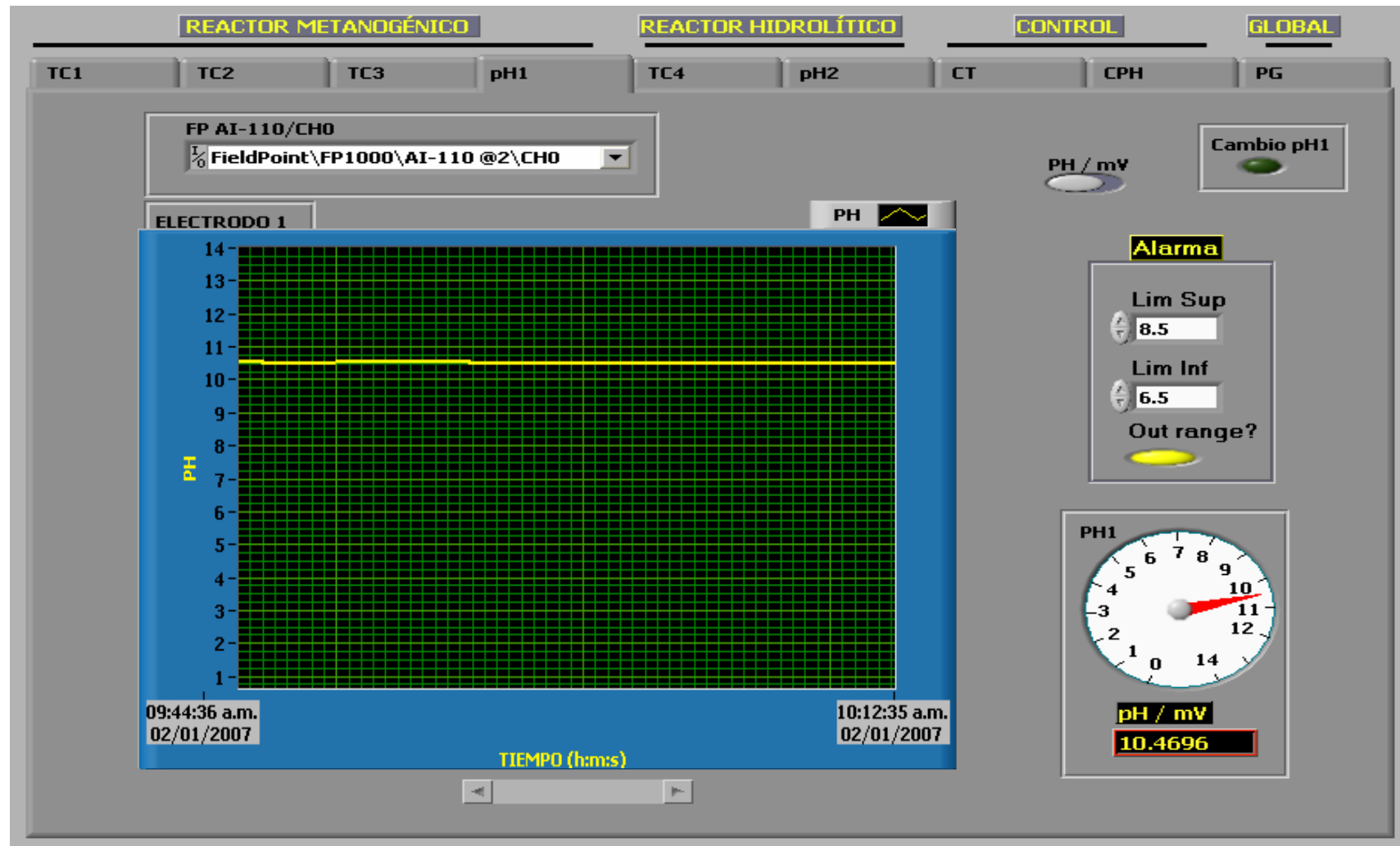
## **ANEXO E. IMÁGENES DE LA INTERFAZ GRÁFICA**

Figura E.1. Página TC1



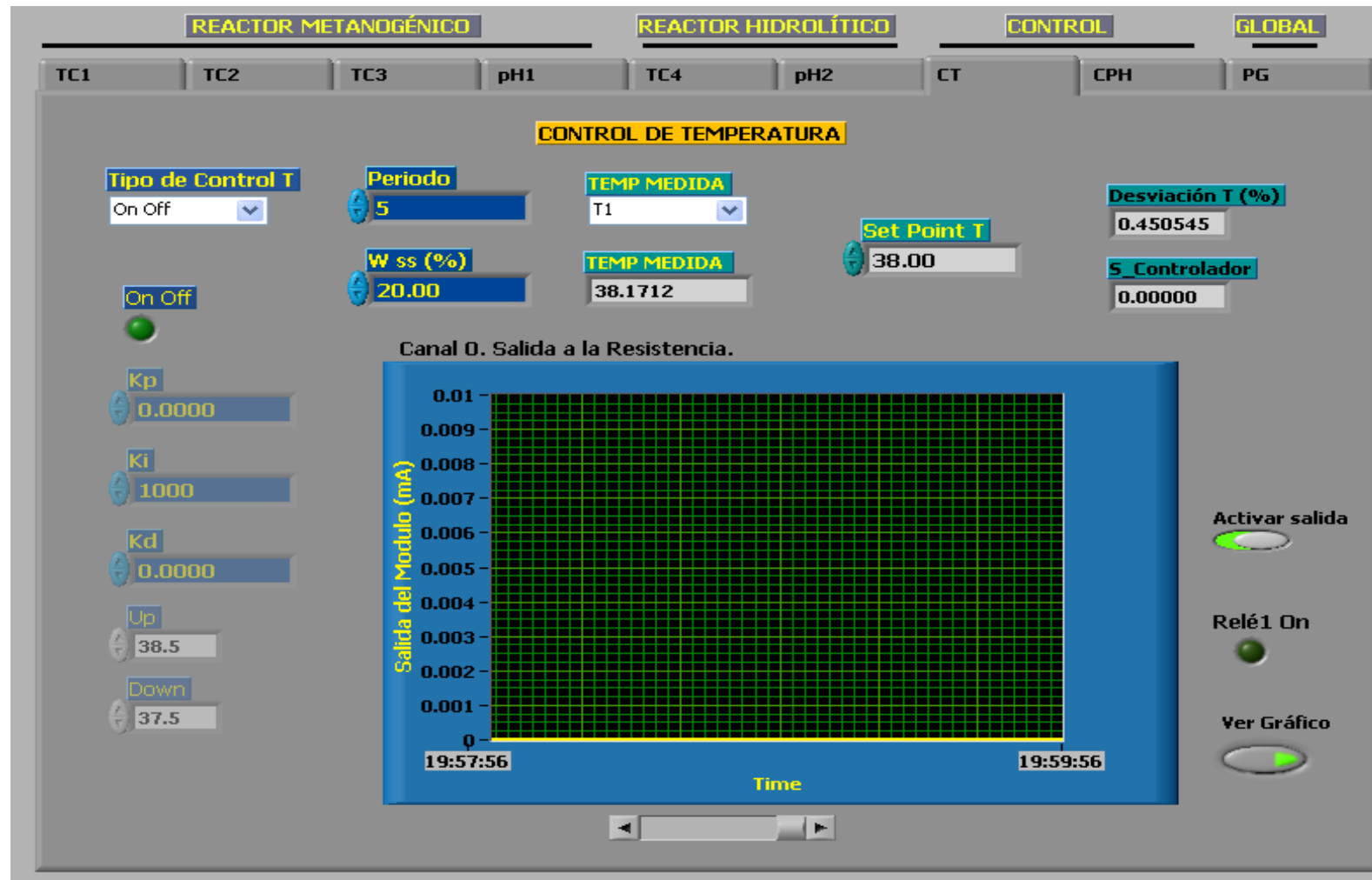
Fuente: Autores

Figura E.2. Página pH1



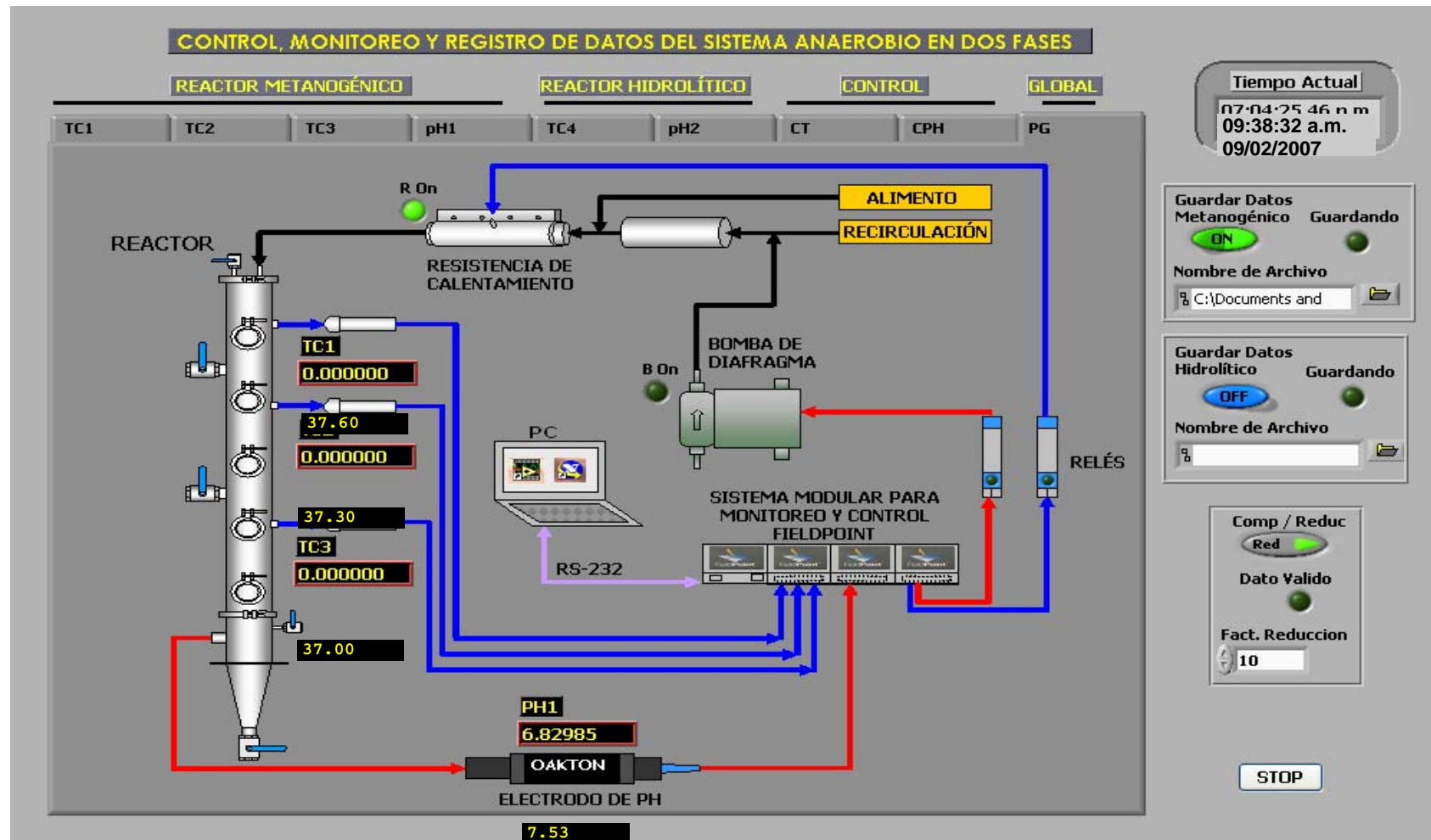
Fuente: Autores

Figura E.3. Página CT



Fuente: Autores

Figura E.4. Página PG



Fuente: Autores