

DISEÑO E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL
DE TEMPERATURA, pH Y OXÍGENO DISUELTO PARA LA FERMENTACIÓN
ACETONA BUTANOL ETANOL A PARTIR DE GLUCOSA

WILLIAM FERNANDO PRIETO VELANDIA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2013

DISEÑO E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL
DE TEMPERATURA, pH Y OXÍGENO DISUELTO PARA LA FERMENTACIÓN
ACETONA BUTANOL ETANOL A PARTIR DE GLUCOSA

WILLIAM FERNANDO PRIETO VELANDIA

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Químico

Director:

Ph. D. Luis Javier López Giraldo

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2013

*A mis padres y hermanos por su cariño, comprensión y apoyo incondicional.
Gracias Señor por brindarme esta maravillosa familia, los amo.*

*A mis tíos, Jorge Velandia y Martha Álvarez por abrirme las puertas de su hogar
durante tantos años.*

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado en el marco del proyecto 5452 “Escalamiento de los procesos de producción de bio-alcoholes y procesamiento de subproductos provenientes de la producción de biocombustibles por vía fermentativa” desarrollado por el Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (CICTA), el Grupo de Investigación en Bioquímica y Microbiología, y el Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM).

A la Universidad Industrial de Santander y en especial a los docentes de ingeniería química por la formación personal y académica brindada durante estos años.

Al profesor Luis Javier López, por su paciencia, colaboración y calidez humana durante el desarrollo del proyecto.

A la doctora Carolina Guzmán, los ingenieros Jhonatan Camacho, Oscar Pérez, Henson Medina y todo el personal del Parque Tecnológico UIS Guatiguara por toda la ayuda dada durante la instalación de fermentor.

A los ingenieros Sandra, Yenny, Pocho y Karen Estefaniz por brindarme parte de su tiempo cuando más lo necesitaba.

A todos mis amigos y compañeros de carrera que hicieron de mi paso por la UIS una experiencia única. Muchas bendiciones para todos.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA	22
1.1 ESTUDIO DE LA FERMENTACIÓN ABE Y SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN	22
1.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE FERMENTACIÓN	23
1.2.1 Biorreactor	23
1.2.2 Tablero de control	24
1.2.3 Lazo de control de temperatura	26
1.2.4 Lazo de control de pH	28
1.2.5 Lazo de control de oxígeno disuelto	29
1.3 FORMULACIÓN DEL MEDIO DE FERMENTACIÓN	29
1.4 CONDICIONES DE OPERACIÓN	30
2. RESULTADOS	32
2.1 INTERFAZ GRÁFICA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL	32
2.2 ESTRATEGIAS DE CONTROL	35
2.2.1 Lazo de temperatura	35
2.2.2 Lazo de pH	38

2.2.2 Lazo de oxígeno disuelto	39
2.3 PRUEBAS PRELIMINARES	40
3. CONCLUSIONES	42
4. RECOMENDACIONES	43
BIBLIOGRAFÍA	44
ANEXOS	50

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Medio de fermentación	30
Tabla 2. Condiciones de operación del proceso fermentativo	31

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema del desarrollo metodológico	22
Figura 2. Montaje del sistema de fermentación	23
Figura 3. Fermentador	24
Figura 4. Tablero de control	25
Figura 5. Sistemas de control	27
Figura 6. Pestaña PAGINA PRINCIPAL	32
Figura 7. Pestaña MONITORIZACIÓN Y REGISTRO	33
Figura 8. Pestaña CONTROL DE TEMPERATURA	34
Figura 9. Pestaña MOTOR DE AGITACIÓN	34
Figura 10. Ejemplo de la respuesta de un PWM en LabVIEW	36
Figura 11. Respuesta de un sistema de control con relé	37
Figura 12. Diagrama de estados para el control ON/OFF modificado	39

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Modelo matemático del controlador PID clásico	20
Ecuación 2. Ganancia última y periodo último con el método de relé	37

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Planos del fermentador y accesorios	50
Anexo B. Descripción de los sensores, actuadores y demás instrumentos del sistema de control	62
Anexo C. Protocolos de preparación y descarga del fermentador	93
Anexo D. Panel frontal del programa de monitorización y diagrama de bloques	96

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL DE TEMPERATURA, pH Y OXÍGENO DISUELTO PARA LA FERMENTACIÓN ACETONA BUTANOL ETANOL A PARTIR DE GLUCOSA*

AUTOR: WILLIAM FERNANDO PRIETO VELANDIA**

PALABRAS CLAVES: Butanol, monitorización y control, fermentador escala piloto-laboratorio, LabVIEW.

CONTENIDO:

La producción de butanol es una alternativa prometedora para reemplazar los recursos fósiles ya que posee mayor poder calórico que el etanol y puede utilizarse sin modificación alguna en los motores convencionales. La fermentación ABE (Acetona-Butanol-Etanol) es el proceso tradicional para la obtención de butanol, sin embargo, se forman numerosos subproductos y se presenta un bajo rendimiento de solventes. Para superar las desventajas del proceso se deben realizar investigaciones a diferentes escalas de producción y bajo una estrategia de control eficiente. El propósito del presente proyecto es diseñar e instalar un sistema de monitorización y control en un fermentador *batch* a escala piloto-laboratorio (50 litros) para la producción de butanol empleando el microorganismo *Clostridium Acetobutylicum* ATCC 824.

Empleando el software LabVIEW, se programó una interfaz gráfica que le permite al usuario interactuar con la operación del sistema de fermentación. Los tres lazos de control pueden emplearse en modo de operación manual o control ON/OFF, adicionalmente, se planteó una aproximación a un control PID con subrutina PWM para la temperatura y una estrategia de control ON/OFF modificado para el pH que tiene en cuenta un tiempo máximo encendido del actuador y un tiempo de mezcla. Se conformó una guía con información sobre la manipulación de cada uno de los equipos y se redactaron los protocolos de preparación y descarga. Una vez instalados los equipos de los lazos de control se realizaron pruebas preliminares comprobando que la interfaz capta las señales de los sensores, muestra sus valores en tiempo real, crea un archivo con los datos de las mediciones tomadas y activa los elementos finales de control como respuesta ante perturbaciones suministradas.

*Proyecto de grado

**Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química.

Director: Luis Javier López Giraldo

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND INSTALLATION OF A MONITORING AND CONTROL SYSTEM OF TEMPERATURE, pH AND DISSOLVED OXYGEN FOR ACETONE-ETHANOL-BUTANOL FERMENTATION FROM GLUCOSE*

AUTHOR: WILLIAM FERNANDO PRIETO VELANDIA**

KEY WORDS: Butanol, monitoring and control, laboratory-pilot scale fermentor, LabVIEW.

The production of butanol is a promising alternative to replace fossil fuels due to its higher caloric power in comparison with ethanol, and also it can be used without modifications in conventional engines. The ABE (Acetone-Butanol-Ethanol) fermentation is the traditional process to obtain butanol however, it forms many sub-products and has low yield of these solvents. To overcome the disadvantages of this process it must be researched in different scales of production and used with efficient control strategic. The objective of this project is to design and install a monitoring and control system in a laboratory-pilot scale batch fermentor (50 liters) for the production of butanol using the microorganism *Clostridium Acetobutylicum* ATCC 824.

Using the software LabVIEW 2011, a graphical interface that allows the user to interact with the fermentation system operation was programmed. The three control systems can be used in manual mode or ON/OFF control, additionally, the following approach was also proposed, PID control with subroutine PWM for temperature and a control strategy ON/OFF MODIFIED for pH, which takes into account a mixing time and a maximum time that the actuator is on. A standard operating procedure with information on handling each piece of equipment was written. After installing the equipment control loops, preliminary tests were performed by checking that the interface receives the signals from the sensors, displays its values in real time, creates a file with data of the measurements taken and active final control elements responded positively to shocks delivered.

*Degree Project

**Physical-Chemistry Engineering Faculty. Chemical Engineering School.
Director: Luis Javier López Giraldo

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la búsqueda de nuevas fuentes de energía y el desarrollo de procesos sostenibles es una prioridad investigativa, debido a la continua fluctuación de los precios del petróleo, la incertidumbre de los futuros suministros de crudo y el impacto ambiental generado por la emisión de gases de efecto invernadero. La producción y uso de biocombustibles obtenidos a partir de materia prima renovable, ofrecen una solución parcial al problema de la quema de recursos fósiles.

Una alternativa tecnológica prometedora en el campo energético y ambiental es la producción de biobutanol, ya que ha sido considerado como un combustible con propiedades más versátiles que el bioetanol. Por ejemplo, el biobutanol tiene mayor poder calórico, menor capacidad higroscópica, menor volatilidad, es menos corrosivo y no presenta restricciones de mezclado con la gasolina. Además, para su empleo no se requiere modificación en los motores de los automóviles. Finalmente, el biobutanol también sirve de materia prima valiosa para la industria química [1-3].

El biobutanol puede obtenerse de diferentes tipos de materias renovable, entre las que se destacan los hidrolizados y jarabes de maíz, trigo, caña de azúcar, remolacha e incluso materiales lignocelulósicos no alimenticios [2-4].

La fermentación acetona-butanol-etanol (ABE) realizada por cepas del género *Clostridium* a partir de hidrolizados de almidón es el proceso biotecnológico tradicional a gran escala para la obtención de biobutanol [1, 4-6]. Sin embargo la viabilidad económica se ve comprometida debido a aspectos negativos como el uso de sustratos (almidón, azúcar) de alto costo que compiten con la demanda alimenticia, la formación de numerosos subproductos, el bajo rendimiento de

solventes por el efecto de toxicidad o inhibición sobre el crecimiento celular (especialmente por butanol) y los altos requerimientos energéticos para la recuperación del butanol por destilación [1, 4, 7].

La búsqueda de métodos alternativos que permitan superar las desventajas propias de la producción a nivel industrial del proceso de fermentación ABE requiere en primer lugar, un estudio sobre el comportamiento del mismo y su uso bajo una estrategia de control eficiente a diferentes escalas de producción (laboratorio, planta piloto, planta industrial) [6], para llevar a cabo los análisis de modelamiento y las pruebas experimentales necesarias que den paso a establecer los mejores mecanismos y las condiciones óptimas de obtención de butanol.

Los procesos no son de comportamiento estático, sus características cambian continuamente debido a los muchos tipos de perturbaciones que se pueden presentar, específicamente en el caso de las fermentaciones, es prioritario proporcionar el ambiente adecuado con el cual los microorganismos puedan crecer, multiplicarse y sintetizar el producto deseado; por las razones anteriores, es necesario diseñar sistemas de monitorización y control que realicen de forma automática las acciones correctivas pertinentes para que las variables más influyentes en el desarrollo del proceso no presenten desviaciones significativas con respecto a los valores deseados (*set point*) y se alcance una operación uniforme y satisfactoria [8-10].

A pesar de la importancia de la monitorización de variables fundamentales para la fermentación como la concentración de biomasa, sustrato y producto, no existen herramientas de medición *on-line* económicas a nivel industrial, en vez de ello, deben recogerse muestras de la fermentación y llevarlas al laboratorio para su posterior análisis. Puesto que las condiciones de fermentación pueden variar mientras se realiza el análisis en el laboratorio, la acción de control basado en dicha medición no resulta efectiva [6, 9, 10]. Sin embargo, es posible realizar un

control del medio de fermentación empleando variables fácilmente medibles como lo son el pH, la concentración de oxígeno disuelto y la temperatura de los cuales sí se disponen de diferentes tipos de sensores *on-line* y junto con el conocimiento de las rutas metabólicas se pueden plantear modelos matemáticos que describen el comportamiento del proceso, permiten estimar variables que no pueden ser medidas directamente y establecen un control efectivo del sistema fermentativo.

En consecuencia, el propósito del presente proyecto es diseñar, instalar y configurar un sistema de monitorización y control de temperatura, pH y oxígeno disuelto de un fermentador *batch* a escala piloto-laboratorio (50 litros) para la producción de n-butanol a partir de glucosa empleando el microorganismo *Clostridium Acetobutylicum* ATCC 824.

El proceso fermentativo para la obtención de solventes por la cepa *Clostridium acetobutylicum* presenta dos fases características relacionadas con el consumo de energía: Durante la fase de crecimiento exponencial o acidogénesis, el microorganismo produce hidrógeno, dióxido de carbono y ácidos orgánicos como el acético, láctico y butírico, lo cual resulta en un descenso del pH del medio y formación de moléculas de ATP [5, 11]. Una vez el cultivo entra en la fase de crecimiento estacionaria o solventogénesis la especie realiza una reasimilación de los ácidos y un continuo consumo de carbohidratos que conllevan a la formación de los solventes (etanol, acetona, butanol) y un aumento en el pH del medio [11, 12]. El paso de la fase acidogénica a la solventogénica depende fuertemente del pH del medio y de la concentración de metabolitos, específicamente del ácido butírico [5, 13]. A continuación se nombran algunos aspectos importantes de las 3 variables a monitorear durante el proceso de fermentación:

Temperatura: La fermentación ABE es un proceso exotérmico donde la liberación de energía está asociada a la velocidad de consumo de glucosa [5, 9]. Tanto el crecimiento de los microorganismos como el rendimiento de solventes son

susceptibles a los cambios en la temperatura [11]; la temperatura a la cual se desea trabajar para obtener las mayores concentraciones de butanol es de 37 °C, haciendo indispensable el uso de un sistema de enfriamiento con agua que circula a través de una chaqueta alrededor de las paredes del biorreactor.

pH: Ha sido reconocido como un factor clave en la obtención de los productos finales de la fermentación ABE. Diferentes observaciones confirman que con un pH alto en el medio de cultivo se producen principalmente ácidos, mientras que en cultivos que se mantienen a pH bajo usualmente predomina la formación de solventes [11, 13]. Sin embargo, el intervalo de pH en el cual se presenta la formación de solventes varía dependiendo de la cepa y las condiciones del medio elegidas en cada caso. Se ha reportado que la cepa *C. acetobutylicum* ATCC 824 produce buenos niveles de solventes a pH entre 4,5 y 5,5 [5, 11]. Para evitar que las condiciones del medio salgan del rango deseado, es necesario dosificar soluciones buffer de ácido o base según requiera el estado actual del sistema, de tal forma que se obtenga un comportamiento estable el mayor intervalo de tiempo posible.

Oxígeno Disuelto (OD): Las bacterias del género *Clostridium* son estrictamente anaerobias. La exposición por corto tiempo de las bacterias a la presencia de oxígeno no es letal, pero a concentraciones suficientemente altas se disminuye la velocidad de consumo de glucosa y se detiene el crecimiento celular. Sin embargo, las consecuencias de la oxigenación son rápidamente reversibles cuando se reestablecen las condiciones anaeróbicas [14]. Ya que el crecimiento exponencial del cultivo de *C. acetobutylicum* puede tolerar exposiciones cortas de concentraciones relativamente altas de oxígeno, es recomendable usar estrategias de control sencillas que eviten tiempos extensos de sintonización a través del suministro de un gas inerte que arrastre el oxígeno disuelto en el medio.

El control del biorreactor proporciona retos especiales debido a la significativa variabilidad del proceso, la complejidad de los sistemas biológicos, la necesidad de operar en un ambiente estéril y las pocas mediciones en tiempo real disponibles para ayudar a definir el estado de un cultivo [10].

En la industria de la fermentación existen varios niveles de control del proceso. El más simple es el control manual, que requiere un operador humano para manipular los dispositivos como bombas, motores y válvulas; en el siguiente nivel, se encuentra la aplicación de herramientas tecnológicas automatizadas como los controladores lógicos Programables (PLC) para establecer lazos de retroalimentación simple para cada una de las variables relevantes del proceso. Sin embargo, en lugar de controladores individuales para cada variable, es común usar un único ordenador para diferentes lazos de retroalimentación [9, 10] por medio de dispositivos y software especializados que le permiten al ordenador registrar las mediciones de una serie de sensores en una secuencia de tiempo determinada y generar señales electrónicas que pueden accionar varios actuadores. El uso de ordenadores abre paso para el desarrollo de técnicas de nivel avanzado como los Sistemas de Control Distribuido (DCS), optimización en tiempo real, control predictivo basado en modelos no lineales, lógica difusa y redes neuronales [6, 9, 10].

Uno de los sistemas de monitorización y control de procesos de uso práctico a escala piloto, envuelve el uso de computadores personales y dispositivos capaces de recibir señales analógicas y convertirlas en formato digital llamados sistemas de adquisición de datos. Las tarjetas DAQ (*Data Acquisition*) son un tipo de sistemas de adquisición que necesitan un ordenador para gobernarlas por medio de lenguajes de programación como Visual Basic, C++, Pascal, LabWindows y labVIEW [15, 16]. Las capacidades comunes que suelen tener las DAQ son [17]:

- Adquisición de señales analógicas
- Generación de señales analógicas

- Generación y adquisición de señales digitales

LabVIEW (acrónimo de *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) es un lenguaje y, a la vez, un entorno de programación gráfica desarrollado por *National Instruments* con el cual se pueden administrar los recursos de las tarjetas de adquisición de datos además de crear códigos de programación en forma de diagrama de bloques, analizar y procesar señales, visualizar resultados a través de una interfaz de usuario gráfica, almacenar datos y generar reportes [17].

Una de las aplicaciones más comunes de LabVIEW es la programación de las estrategias clásicas de control de procesos de retroalimentación o *feedback*, del tipo:

- Controlador *on-off*: Se utiliza cuando el elemento final de control o actuador es un dispositivo abierto-cerrado (los más económicos), como una bomba de velocidad constante o una válvula solenoide; en este tipo de estrategias se tolera un rango alrededor del *set point* en el cual se puede ubicar la variable de proceso (histéresis) con el fin de evitar continuos encendidos y apagados [9].
- Controlador PID: Es el más empleado en la industria de la fermentación [6, 10]. Se encuentra constituido por tres términos (ecuación 1), proporcional (P), integral (I) y derivativo (D)

Ecuación 1. Modelo matemático del controlador PID clásico

$$m(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

La acción proporcional establece que la señal de salida del controlador sea proporcional al error (diferencia entre el *set point* y la variable de proceso); la acción integral elimina el error de estado estacionario que se produce cuando se usa sólo la acción proporcional agregando a la salida el error acumulado; la acción

derivativa le otorga al controlador la capacidad de anticiparse a la trayectoria del error [8].

Al instalar un sistema de control en el biorreactor se pretende reducir la variabilidad del proceso, mejorar el rendimiento, monitorear el funcionamiento del sistema fermentativo y a la vez evitar que el operario tenga que monitorear constantemente el reactor para registrar las variaciones de pH, temperatura y concentración de oxígeno disuelto. La interfaz implementada en LabVIEW provee los datos de las variables medidas en tiempo real, con una precisión garantizada por la instrumentación utilizada y además crea reportes de estas variables en un archivo de Excel para su posterior análisis [15, 17].

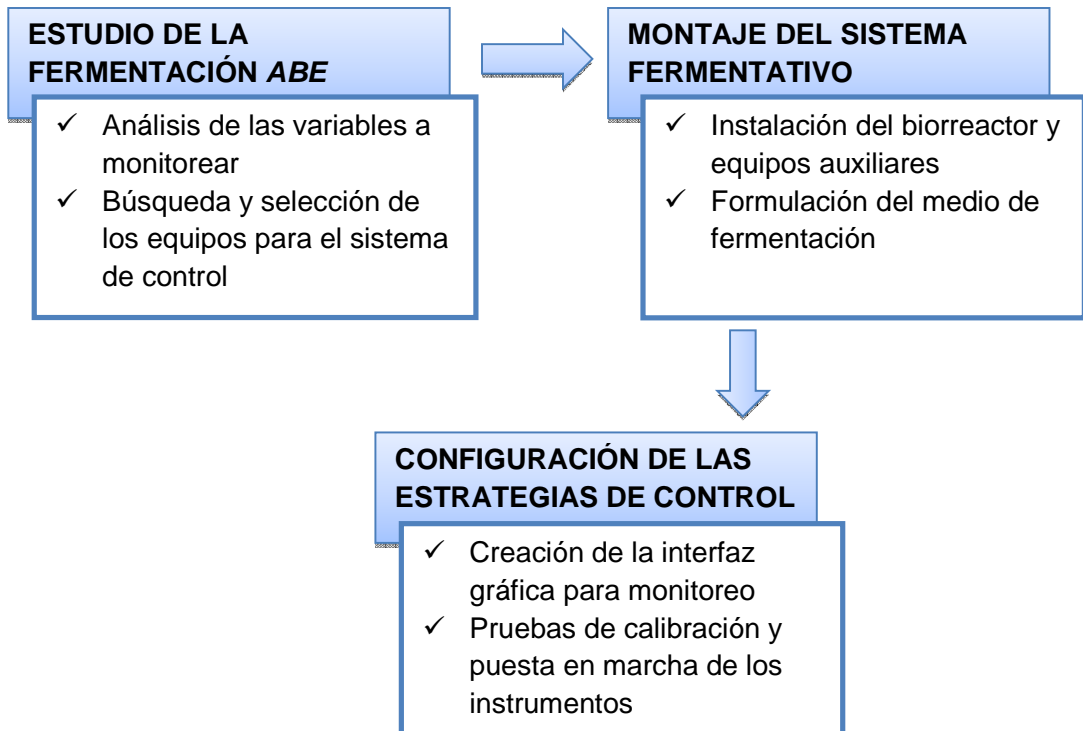
El presente trabajo se enmarca dentro del área estratégica de investigación en biotecnología y agroindustria de la Universidad Industrial de Santander bajo el proyecto “Escalamiento de los procesos de producción de bio-alcoholes y procesamiento de subproductos provenientes de la producción de biocombustibles por vía fermentativa” (Código 5452) desarrollado por el Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (CICTA), el Grupo de Investigación en Bioquímica y Microbiología, y el Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM).

1. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

En este capítulo se presenta el procedimiento que se llevó a cabo para cumplir el objetivo de implementar los lazos de control en el fermentador a escala piloto-laboratorio (50 litros) y una descripción de los diferentes montajes realizados.

En el siguiente esquema (figura 1) se muestra la secuencia de los pasos realizados en el marco del proyecto:

Figura 1. Esquema del desarrollo metodológico



1.1 ESTUDIO DE LA FERMENTACIÓN ABE Y SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN

A través de una revisión bibliográfica se conocieron las características fundamentales del proceso fermentativo Acetona – Butanol – Etanol (ABE), las condiciones de operación y los principales aspectos referentes a sistemas de adquisición de datos y programación gráfica. De la misma forma se realizó la

búsqueda y selección de los diferentes dispositivos que conforman los lazos de control teniendo en cuenta tres aspectos: (i) bajo costo, (ii) compatible con la tarjeta de adquisición de datos, (iii) fácil instalación en el tanque de fermentación.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE FERMENTACIÓN

En la figura 2 se muestra el montaje del tanque de fermentación y equipos auxiliares que se encuentran ubicados en el laboratorio 405 del edificio Parque Tecnológico UIS Guatimar; a continuación se describen las características principales del biorreactor, tablero y lazos de control de temperatura, pH y concentración de oxígeno disuelto:

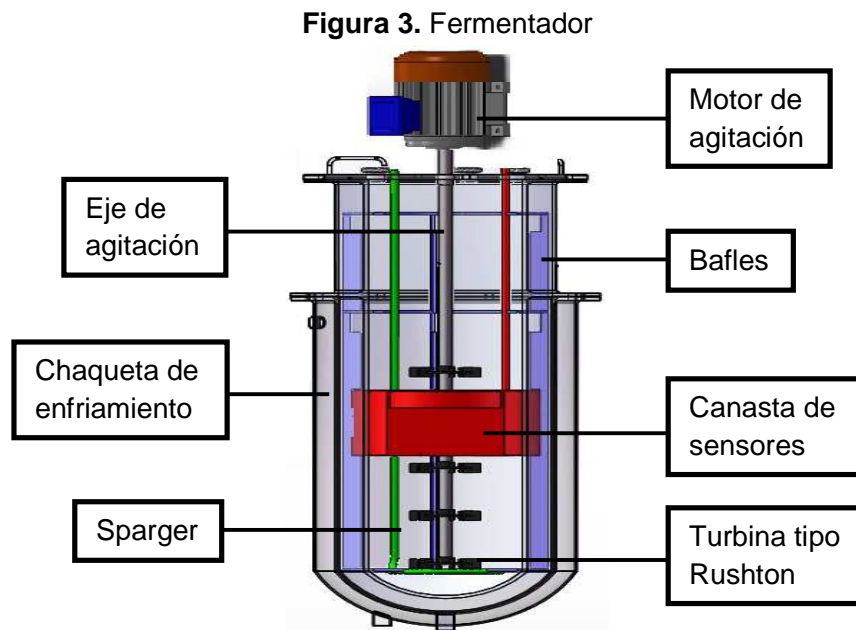
Figura 2. Montaje del sistema de fermentación



1.2.1 Biorreactor

Construido en acero inoxidable 316L con una capacidad máxima de 50 litros (figura 3), rodeado por una chaqueta para enfriamiento fabricada en acero inoxidable 304, sobre la tapa del fermentador se encuentra un moto-reductor marca *SEW* de 3/4 hp que activa el movimiento de un eje de agitación con 5

turbinas tipo *Rushton* de 6 palas paralelas al eje; en el interior del fermentador se encuentra un sistema de 4 baffles removibles, una canasta tubular de altura ajustable para el acople de los sensores garantizando mediciones *in situ* y un difusor tipo anillo o *sparger* que permite el suministro de gases al medio de fermentación a través de perforaciones en la base del tubo, todos los accesorios ubicados en el interior del tanque son de acero inoxidable 316L [12].

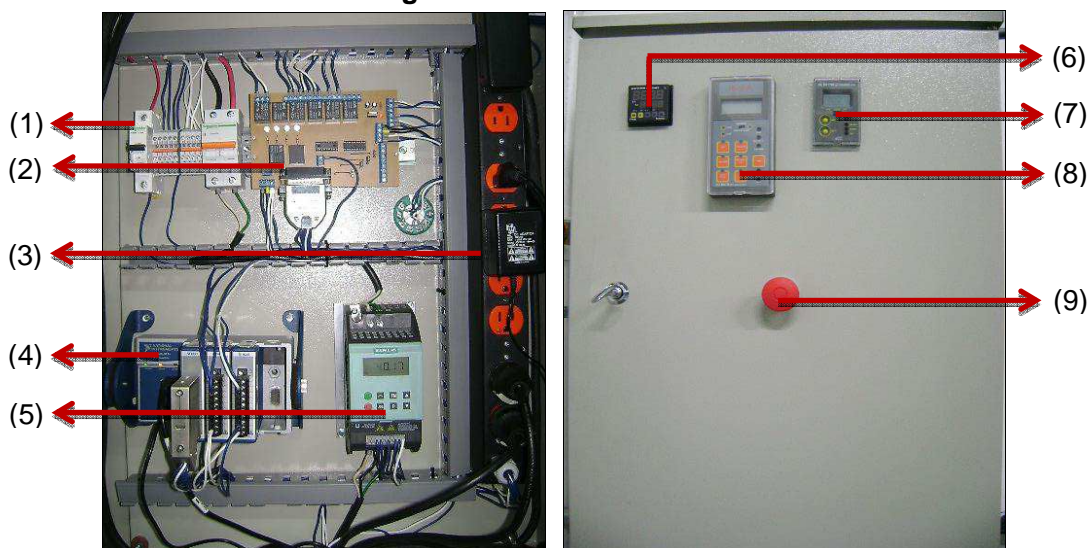


En el anexo A se presentan los planos del biorreactor y demás accesorios diseñados en *SolidWork*.

1.2.2 Tablero de control

Es el compartimiento que permite la distribución de energía eléctrica al motor de agitación, controladores y actuadores del sistema de fermentación. La figura 4 presenta los diferentes instrumentos que conforman el tablero de control:

Figura 4. Tablero de control



- (1) Breacker: Proporciona la alimentación de 110 y 220 VAC y establece protección ante emergencias cortando el flujo de corriente.
- (2) Tarjeta de interfaz de salidas digitales: Contiene 8 relés que dan la activación de los elementos finales de control según la señal digital que reciban.
- (3) Multitoma de 8 puestos.
- (4) NI *CompactDAQ*: Es un dispositivo fabricado por *National Instrument* que actúa como interfaz entre el computador y las señales de los sensores. Consta de un *chassis* con bus de comunicación tipo USB 2.0 y 4 espacios para la instalación de los módulos necesarios. Para la presente aplicación los módulos empleados son la NI 9401 con 8 canales para entradas y salidas digitales (DI/O), NI 9203 para 8 entradas analógicas (AI) y NI 9265 con 4 canales de salidas analógicas (AO) [18 – 21].
- (5) Convertidor *Sinamics G110* para el motor de agitación, marca *Siemens*, con alimentación de 220 VAC, modifica la velocidad de rotación del motor de 0 a 90 rpm [22].
- (6) Controlador de Temperatura TZN4S, recibe señales de termocuplas, RTD o analógicas, visualiza el valor de temperatura actual y emite señales de corriente de 4-20 mA, marca *Autonics* [23]. Este controlador únicamente

realizará la función de ser un transductor de señales y no se configurará ningún parámetro en él para permitir que la función de controlador sea desarrollada completamente por la interfaz gráfica programada.

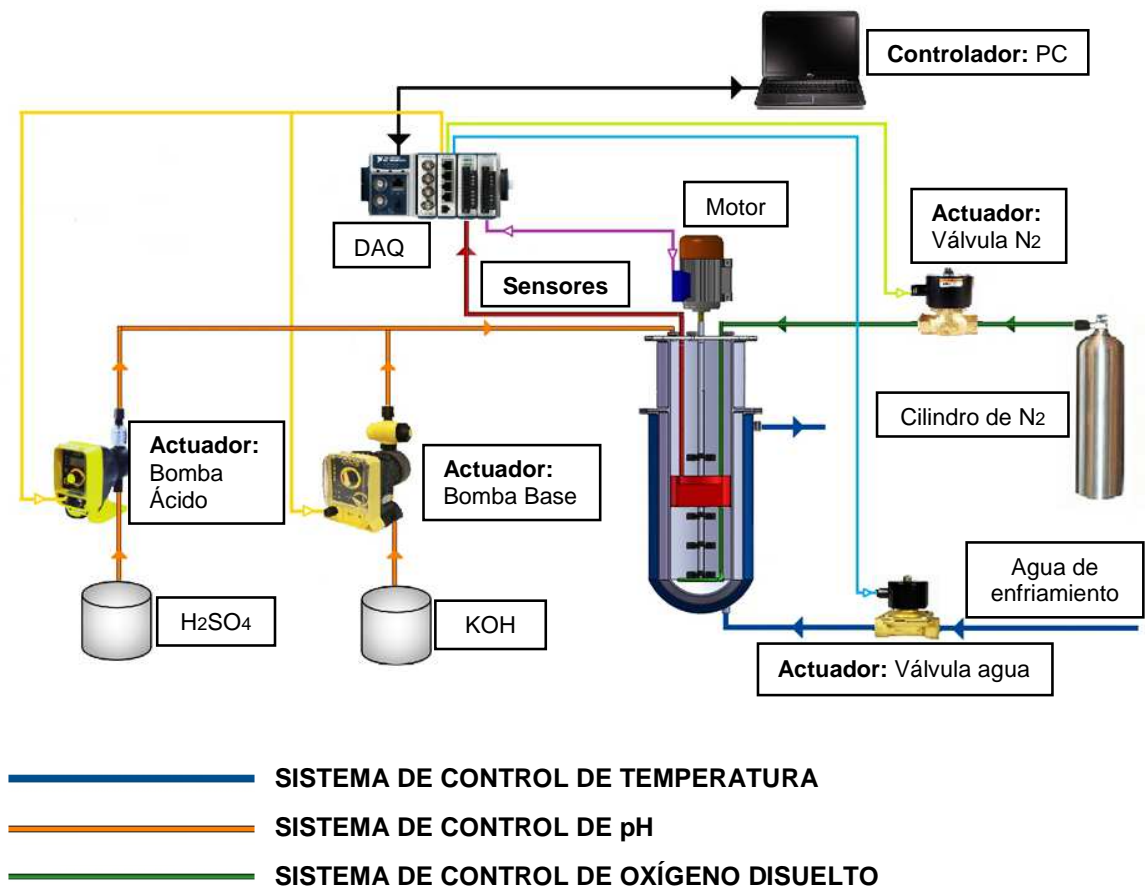
- (7) Minicontrolador de pH BL 931700, marca *Black Stone*, con conexión BNC para electrodos de pH, salida de 4-20 mA [24]. Trabaja como convertidor de señales.
- (8) Controlador/Indicador de Oxígeno Disuelto HI 8410, marca *HANNA instruments*, recibe la señal de sondas galvánicas, indica las concentraciones en mg/l (ppm) y genera señales analógicas de 0-20 mA o de 4-20 mA [25]. Al igual que el controlador de temperatura y el minicontrolador de pH, este elemento trabajará para adaptar la señal del sensor y transferirla a la tarjeta de adquisición de datos.
- (9) Botón pulsador como paro de emergencia del motor de agitación y elementos finales de control.

1.2.3 Lazo de control de temperatura

La figura 5 es una representación simplificada de los sistemas de control de las tres variables a monitorear en el proceso de fermentación.

En el anexo B se encuentra una descripción más detallada de los sensores, actuadores y demás instrumentos utilizados en el sistema de fermentación, junto con información para su instalación, manipulación, mantenimiento y calibración, con el fin de conformar una guía de operación, de fácil comprensión, para futuros desarrollos experimentales.

Figura 5. Sistemas de control



El sistema de control de temperatura está conformado por:

Sensor/Transmisor: Una termorresistencia (RTD) pt-100, de acero inoxidable 304 [26], ubicada en la canasta tubular del interior del biorreactor, modifica su componente resistivo según las variaciones de temperatura del medio de fermentación; el controlador TZN4S mide la corriente que circula a través de la RTD indicando el valor de temperatura asociado a la medición en el rango de 0 a 100 °C y emite una señal de corriente en el rango de 4-20 mA.

Transductor: El módulo NI-AI-9203 de la tarjeta DAQ recibe la señal de corriente para acondicionarla con las acciones de amplificación, atenuación, filtrado y aislamiento que sean necesarias para luego convertir la señal a digital por un

convertidor análogo digital (ADC) de 16 bits de resolución y enviarla por el bus de comunicación USB [27].

Controlador: El computador recibe la señal por el puerto USB y a través de la interfaz gráfica programada realiza la monitorización, compara el valor medido con el *set point*, evalúa el error y toma la decisión correspondiente.

Actuador: La interfaz gráfica programada envía una señal al módulo NI-DO-9401 para activar el relé correspondiente que abre una válvula solenoide dando paso al flujo de agua de enfriamiento. La válvula de marca *UNI-D* abierta en falla, requiere alimentación de 110 VAC, con diámetro interno de 3/8" [28].

1.2.4 Lazo de control de pH

Sensor/Transmisor: Un electro de pH de marca *Hanna Instruments* serie 1001 [29], genera una señal que es medida por el minicontrolador BL 931700 el cual muestra el valor de pH correspondiente en el panel frontal del tablero de control (rango de 0 a 14 pH) y emite una señal de corriente de 4 a 20 mA al módulo NI-AI-9203 de la *DAQ* donde la señal es digitalizada y enviada al computador.

Controlador: La interfaz gráfica visualiza los datos y emite una señal al módulo NI-DO-9401 que activará uno de dos posibles relés.

Actuador: Si el pH medido se encuentra por debajo del valor de *set point*, uno de los relés enciende una bomba que añade álcali al fermentador, cuando ha añadido suficiente álcali y el pH retorna al valor deseado, el relé se desactiva y la bomba se apaga; en caso que el pH del medio este arriba del *set point*, la decisión que toma el controlador es activar otro relé que suministra corriente a una bomba que añade ácido, de forma similar al suministro de álcali. Las bombas dosificadoras que añaden ácido y/o base son del tipo de desplazamiento positivo, marca *LMI Milton Roy*, el volumen de salida puede ser ajustado en un rango de cero a 1,0 GPH (galones por hora) y la presión de inyección generada es de máximo 110 psi [30].

1.2.5 Lazo de control de oxígeno disuelto

Sensor/Transmisor: Una sonda galvánica marca *Hanna Instruments*, serie 76409/4 genera una señal proporcional a la concentración de O₂ disuelto [31], la señal emitida por la sonda es recibida por el controlador HI 8410 el cual muestra la concentración de oxígeno en un rango de 0 a 50 mg/l o de 0 a 600% de saturación y envía una señal análoga de 4-20 mA a la tarjeta *DAQ* por medio del módulo NI-AI-9203.

Controlador: El computador recibe por el puerto USB una señal que fue digitalizada por la tarjeta *DAQ* y representa a través de la interfaz gráfica las variaciones de OD del medio. Al comparar la medición realizada por la sonda con el *set point*, el controlador activa o no uno de los relés.

Actuador: Con la activación del relé se abre una válvula solenoide que da paso a un flujo de N₂ (99,999% de pureza) proveniente de un cilindro contenedor con regulador de presión de 0 a 150 psi. El gas inerte entra al fermentador a través del *sparger* y arrastra el O₂ presente en el medio líquido. La válvula es de marca *UNI-D*, cerrada en falla, diámetro interno de 1/4" [32].

1.3 FORMULACIÓN DEL MEDIO DE FERMENTACIÓN

El medio de fermentación es el ambiente en el cual los microorganismos viven, se reproducen y llevan a cabo las reacciones metabólicas específicas para obtener los productos. El objetivo en la formulación es proporcionar ingredientes ricos en algunos nutrientes fundamentales como la fuente de carbono, nitrógeno, azufre, fósforo y otros minerales de tal forma que se obtenga una mayor productividad de butanol a menor costo.

En el caso de la fuente de nitrógeno, en fermentaciones a gran escala se suelen usar tres tipos de ingredientes: Derivados de productos agrícolas como el extracto de frijol de soya o el gluten de maíz, extractos de levadura y subproductos de la carne y el pescado [33]. Por otro lado, una combinación de fuente orgánica e

inorgánica de nitrógeno como sulfato de amonio, genera una mayor producción de solventes [34, 35].

Para el presente trabajo se propone usar como base el medio de fermentación (Tabla 1) empleado por *Fuciños & Pallares* (2011) [5] ya que mantiene una relación molar de Carbono/Nitrógeno alta (C/N = 20) que incrementa la cantidad de los solventes ABE producidos [35, 36] pero donde el 75% del nitrógeno requerido sea proporcionado por el sulfato de amonio ya que tiene un menor costo en comparación con el extracto de carne como fuente orgánica.

Tabla 1. Medio de fermentación

Compuesto	Concentración (g/l)
Glucosa	60
Extracto de Carne	2,632
(NH ₄) ₂ SO ₄	4,953
KH ₂ PO ₄	0,75
K ₂ HPO ₄ .3H ₂ O	0,75
NaCl	1
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,2
MnSO ₄ .H ₂ O	0,01
FeSO ₄ .7H ₂ O	0,01
L(+)-Cisteína	0,5

Fuente: Autor

Cuando las sales son usadas como fuente de nitrógeno, su metabolismo invariablemente resulta en cambios en el pH del medio (empleando sulfato de amonio se tiende a bajar el pH), por lo tanto es importante que las soluciones buffer empleadas para controlar el pH contrarresten los efectos de las sales de nitrógeno [33].

1.4 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Las pruebas experimentales a desarrollar en el fermentador se realizarían con las condiciones de operación presentadas en la tabla 2.

Tabla 2. Condiciones de operación del proceso fermentativo

Variable de Proceso	Valor
Volumen de fermentación	25 litros
Inóculo	10% v/v
Velocidad de agitación	80 rpm
Presión de suministro de N ₂	1,5 bar
Flujo de agua de enfriamiento	6 l/min
Temperatura de entrada del agua de enfriamiento	25 °C
Flujo de ácido y base	50 ml/min
Tiempo de fermentación	48 horas

Fuente: Autor

Bajo el marco del presente trabajo se redactaron los protocolos de preparación y descarga del fermentador (anexo C) para establecer una fácil comprensión y manejo del sistema fermentativo a escala piloto-laboratorio para futuros estudios experimentales.

2. RESULTADOS

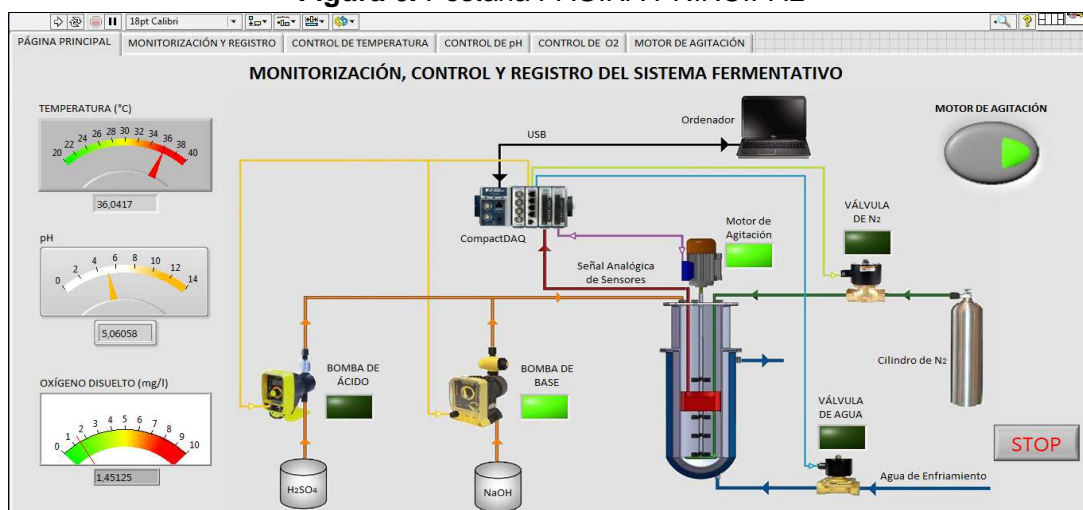
2.1 INTERFAZ GRÁFICA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL

Empleando el software LabVIEW 2011 se programó una interfaz de usuario gráfica que cumple los siguientes objetivos:

- Presentar las mediciones *on-line* de temperatura, pH y oxígeno disuelto del interior del fermentador.
- Crear un archivo en formato *.lvm* (*LabVIEW measurements*) con los datos de las mediciones tomadas en un intervalo de muestreo escogido por el usuario.
- Activar los elementos finales de control por orden del usuario o en forma automática según la estrategia seleccionada para cada variable.

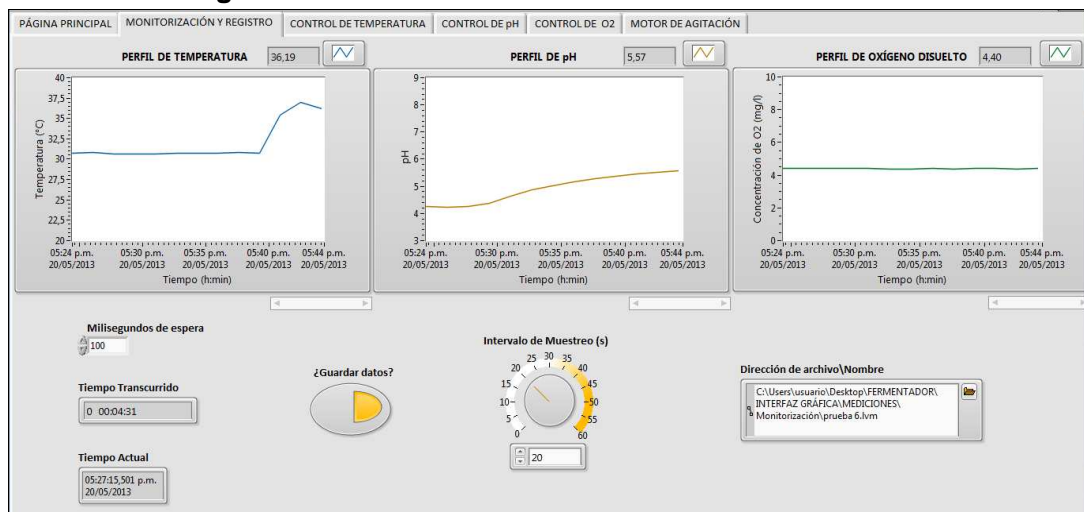
El manejo de la interfaz gráfica se realiza a través de seis pestañas; en la primer pestaña o PAGINA PRINCIPAL (figura 6) se encuentran tres indicadores gráficos que muestran las mediciones realizadas, un esquema de los tres lazos de control con *leds* que indican la activación de cada uno de los elementos finales de control, un botón que manipula el encendido o apagado del motor de agitación y un botón con el cuál se detiene la adquisición de datos y se apagan todos los actuadores.

Figura 6. Pestaña PAGINA PRINCIPAL



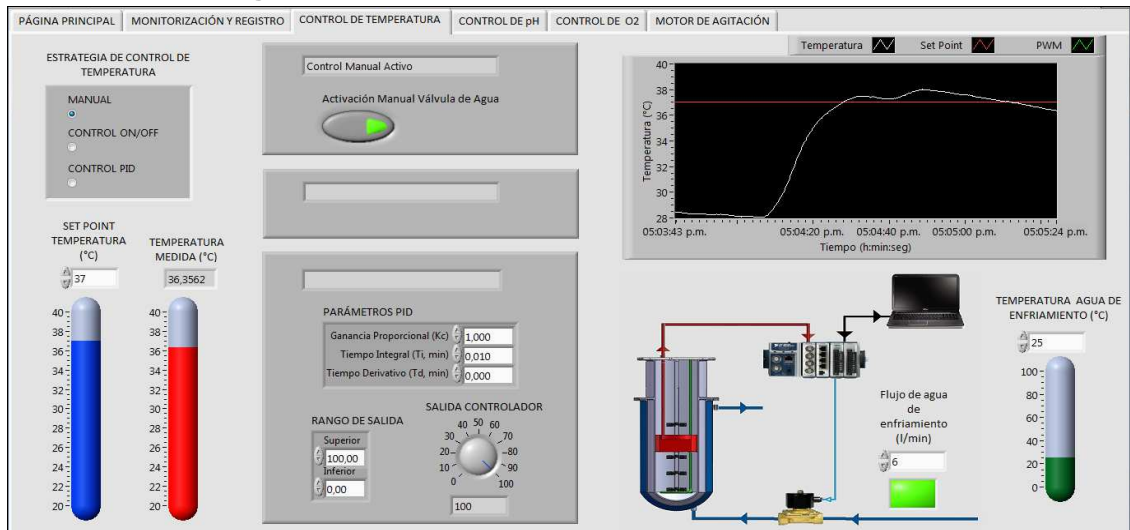
La segunda pestaña llamada MONITORIZACIÓN Y REGISTRO (figura 7) contiene tres gráficas que muestran los perfiles de las variables a controlar, un botón con el cual se inicia el almacenamiento de los datos, un control numérico para seleccionar el intervalo de muestreo y un control para seleccionar la dirección y el nombre del archivo a guardar.

Figura 7. Pestaña MONITORIZACIÓN Y REGISTRO



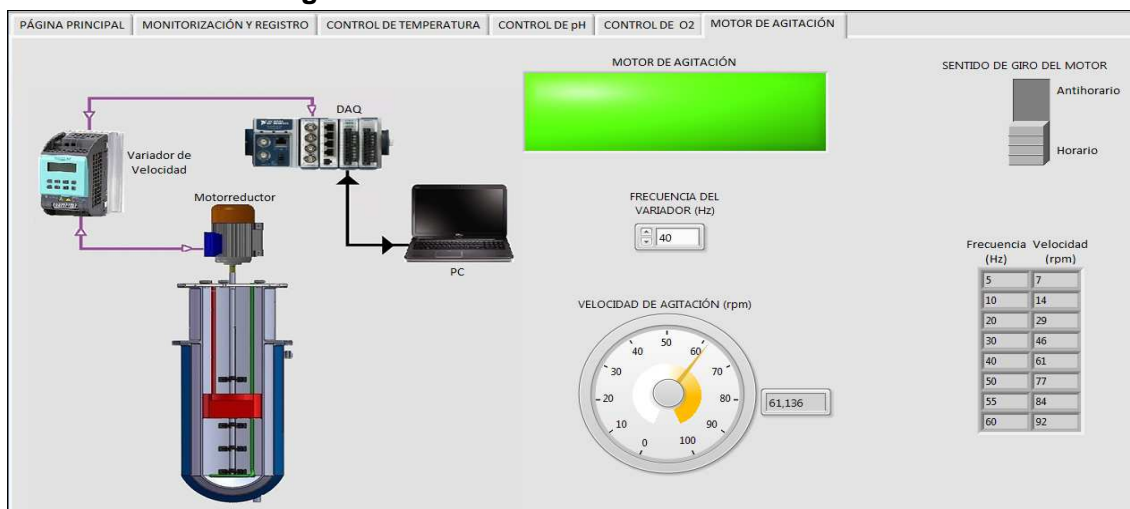
Las pestañas tres, cuatro y cinco tienen los nombres de CONTROL DE TEMPERATURA, CONTROL DE pH y CONTROL DE O₂ respectivamente, ellas contienen elementos similares como indicadores gráficos y numéricos de las mediciones *on-line*, botones para seleccionar la estrategia de control a aplicar, controles numéricos para ingresar parámetros como el *set point* y un esquema del lazo de control correspondiente; la figura 8 presenta la pestaña de CONTROL DE TEMPERATURA.

Figura 8. Pestaña CONTROL DE TEMPERATURA



La última pestaña (figura 9) presenta el lazo implementado para el motor de agitación, un indicador numérico de la velocidad de agitación, un botón para realizar el cambio de sentido de rotación y una tabla de equivalencias entre la frecuencia ajustada en el variador y la velocidad de agitación correspondiente (el ajuste de la frecuencia se debe hacer a través de una perilla en el panel de control).

Figura 9. Pestaña MOTOR DE AGITACIÓN



Para una descripción más detallada de cada una de las pestañas y el diagrama de bloques asociado al código del programa de monitorización remitirse al anexo D.

2.2 ESTRATEGIAS DE CONTROL

2.2.1 Lazo de temperatura

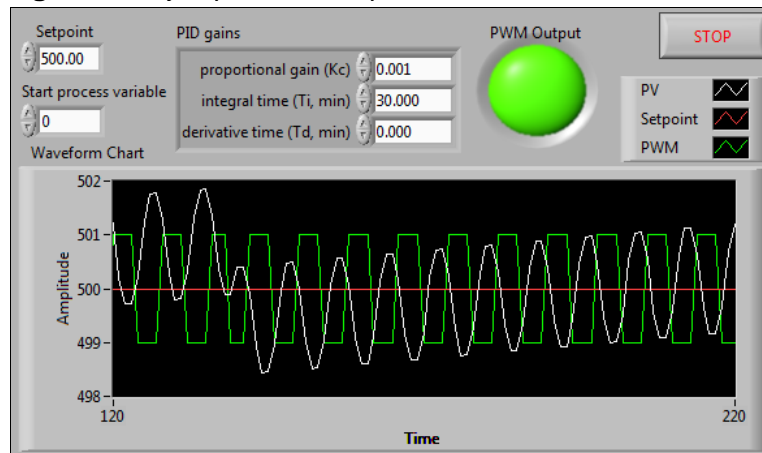
A través de la interfaz gráfica se puede seleccionar una de las tres estrategias configuradas:

Manual: El operador decide el momento de abrir o cerrar la válvula de flujo de agua de enfriamiento. Al momento de cambiar de estrategia o detener la adquisición de datos, el botón de activación de la válvula regresa a su estado por defecto de apagado.

Control ON/OFF: Requiere que el operador ingrese un *set point* de temperatura. Si la temperatura es superior al *set point*, la válvula se abre y permite el flujo de agua a través de la chaqueta; una vez la temperatura sea igual o inferior al *set point* la válvula se cierra.

Control PID: Entre los *Toolset* que posee LabVIEW se encuentra una función o VI (acrónimo de *Virtual Instrument*) que posee el algoritmo para control PID, de fácil configuración en cualquier aplicación; el VI de control PID requiere como datos de entrada la variable de proceso, el *set point* y los parámetros del controlador tales como la ganancia proporcional, el tiempo integral y el tiempo derivativo. La respuesta del controlador se encuentra expresada en porcentaje de salida en un rango de 0 a 100 (aunque puede modificarse a través de la interfaz gráfica). Aunque la señal de salida del bloque PID en el código de LabVIEW es continua, la operación de la válvula es de forma discreta; para tratar de establecer una relación entre estos dos mecanismos, se programó una rutina que simula el funcionamiento de un PWM (*Pulse Width Modulation*) ya que es una técnica que modifica el ciclo de trabajo de una señal o fuente de energía a través de un “switchero constante”, la figura 10 presenta un ejemplo de la ejecución de un PWM sobre una variable de proceso en LabVIEW.

Figura 10. Ejemplo de la respuesta de un PWM en LabVIEW



Fuente: National Instruments. PID VI Used for PWM Control. NI Developer Community.

En la rutina programada, la señal de salida del bloque PID es constantemente comparada con la respuesta que se dio en el ciclo anterior de ejecución del programa de tal forma que se pueden dar los siguientes casos:

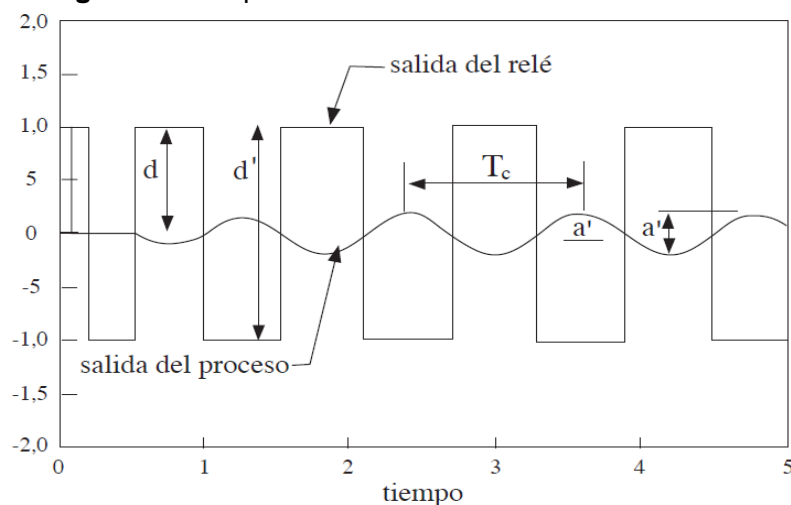
- Si la señal generada por el controlador es mayor a la anterior implica que la válvula de control debería permitir mayor flujo de agua si ésta fuera de acción proporcional, por tanto la orden del PWM es abrir la válvula solenoide.
- Si la señal generada es menor a la anterior una válvula proporcional debería disminuir el flujo de agua, en este caso la orden del PWM es cerrar la válvula solenoide.
- Si la señal de salida del controlador se mantiene constante, la válvula solenoide permanece en la misma posición.

La temperatura ha sido una de las variables más estudiadas en el control de procesos, en el caso de las fermentaciones, el control PID es la estrategia más empleada, de tal forma que esta alternativa siempre debe ser considerada como una de las primeras estrategias a implementar y LabVIEW posee la capacidad de procesamiento necesaria para resolver los cálculos de este algoritmo.

La sintonización del controlador PID se convierte en un reto especial: el método convencional de ajuste del controlador es el propuesto por Ziegler y Nichols, para

ello se debe caracterizar el proceso con parámetros como la ganancia y periodo últimos (K_{cu} , T_u) o un modelo de primer orden más tiempo muerto [8]; si se usa el método de lazo abierto con una prueba de escalón (el procedimiento más simple) es de esperar que la curva de reacción del proceso no presente la forma de S característica de los procesos de segundo orden o superior como lo demostró *Fuciños & Palleres* (2011) [5]; si se realiza el método de lazo cerrado o ajuste en línea en el cual se incrementa gradualmente la ganancia de un controlador proporcional hasta obtener un oscilación sostenida (estado en el cual el sistema alcanza la ganancia y periodo últimos) implicaría realizar un gran número de experimentos (un procedimiento desgastante ya que el proceso es discreto). Como alternativa se podría obtener los parámetros últimos por el método de relé como lo proponen *Aström & Hägglund* (1984) [39, 40] presentado en la figura 11, en este caso, los parámetros últimos se pueden determinar con la ecuación 2.

Figura 11. Respuesta de un sistema de control con relé.



Fuente: ALFARO, V. M. Actualización del método de sintonización de controladores de Ziegler y Nichols. En: Ingeniería (Costa Rica). 2005. vol. 15, no. 1-2, p. 39-52. [40]

Ecuación 2. Ganancia última y periodo último con el método de relé

$$K_{cu} = \frac{4d}{\pi a} = \frac{4d'}{\pi a'} \quad T_u = T_c$$

Si se selecciona la estrategia de control ON/OFF en la interfaz gráfica programada, en el mejor de los casos, se obtendrá una respuesta similar a la presentada en la figura 11 ya que la válvula que manipula el flujo de agua es de funcionamiento análogo a un relé, de tal que se podrían calcular los parámetros últimos y sintonizar el controlador PID con las reglas de Ziegler y Nichols; en caso contrario, la alternativa de control ON/OFF será la más factible.

2.2.2 Lazo de pH

Las tres estrategias configuradas son:

Manual: El operador puede encender o apagar cualquiera de las dos bombas instaladas que dosificaran ácido y/o base al medio de fermentación. Al momento de cambiar de estrategia o detener la adquisición de datos, los botones de activación de las bombas regresan a su estado por defecto de apagado.

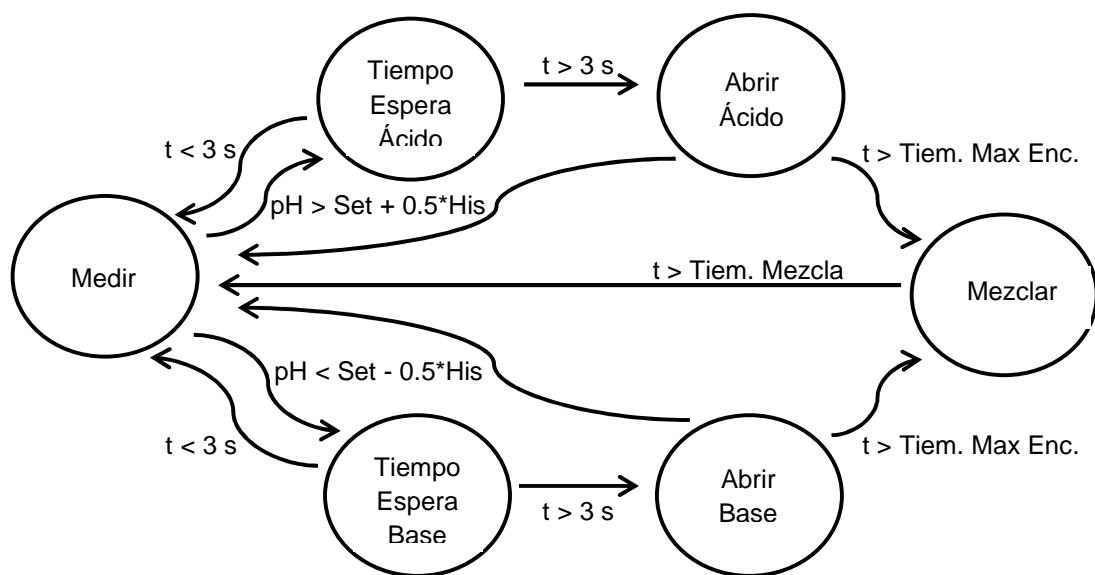
Control ON/OFF: Para la ejecución de ésta estrategia, el operador debe ingresar dos parámetros, el *set point* y la histéresis. Si el pH es superior al *set point* más la mitad de la histéresis, la bomba que dosifica solución alcalina se encenderá; si el pH es inferior al *set point* menos la mitad de la histéresis, la bomba que dosifica ácido se encenderá; si el pH se encuentra en el rango tolerable, las dos bombas permanecen apagadas.

Control ON/OFF Modificado: Con la operación del control ON/OFF tradicional, se puede presentar el problema de mantener las bombas de dosificación encendidas por un periodo de tiempo demasiado largo (hasta que el pH vuelva al rango tolerable) y la cantidad de solución buffer suministrada sea excesiva pues la dinámica del pH suele ser muy lenta. Para evitar estos inconvenientes, se propone asignar un TIEMPO MÁXIMO ENCENDIDO para las bombas y un TIEMPO DE MEZCLA para permitirle al medio de fermentación alcanzar una completa difusión de las soluciones suministradas. Con la introducción de estos dos parámetros, el control de pH realizará una transición entre varios estados posibles según la entrada recibida en cada estado, estas características definen a una *máquina de estados finita* [17], donde: $estado\ siguiente = f(estado\ actual, entrada\ actual)$

La figura 12 presenta un diagrama de estados donde se observan las transiciones para el control de pH con 4 parámetros: *set point*, histéresis, tiempo máximo encendido y tiempo de mezcla.

Una máquina de estados es un método de desarrollo de sencilla programación en LabVIEW, el anexo D presenta el diagrama de bloques para cada uno de los estados del control ON/OFF modificado.

Figura 12. Diagrama de estados para el control ON/OFF modificado



Implementar una estrategia de control PID para el pH conlleva a resolver un problema de gran complejidad al momento de caracterizar el proceso y sintonizar el regulador puesto que se tiene dos elementos finales de control que operan de forma discreta, por tanto se sugiere mantener las estrategias de control sencillas que fueron implementadas en la interfaz gráfica y evitar tiempos extensos de sintonización.

2.2.3 Lazo de oxígeno disuelto

Las dos estrategias programadas son:

Manual: El operador abre o cierra la válvula de flujo de nitrógeno.

Control ON/OFF: Fue programado como una máquina de estados sencilla con dos parámetros a ajustar, la TOLERANCIA MÁXIMA DE O₂ (mg/l) y el TIEMPO

MÁXIMO ABIERTO de la válvula. En esta estrategia, se presenta flujo de nitrógeno al medio de fermentación si el valor de oxígeno disuelto medido se encuentra fuera de la tolerancia hasta que el tiempo sea igual al máximo asignado, en ese momento se cierra la válvula, sin embargo, si el valor de OD sigue estando fuera del rango deseado la válvula se vuelve abrir una vez haya transcurrido la misma cantidad de tiempo que el TIEMPO MÁXIMO ABIERTO. El propósito de esta estrategia es reducir el consumo de nitrógeno.

2.3 PRUEBAS PRELIMINARES

Una vez instalados los equipos de los lazos de control y creada la interfaz gráfica, se realizaron pruebas preliminares comprobando que la interfaz capta las señales de los sensores, muestra sus valores en tiempo real y activa los elementos finales de control como respuesta ante perturbaciones suministradas; para ello, cada uno de los sensores fue sumergido en soluciones que simularan diferentes condiciones que pueden ocurrir en una operación del fermentador; las siguientes son algunas de las acciones realizadas:

- Se cambiaba la RTD entre varios recipientes con agua a diferentes temperaturas, en los casos en que la temperatura era superior al valor de *set point*, la válvula solenoide permitía el paso de agua a través de la chaqueta en el fermentador.
- El electrodo de pH se sumergía en soluciones con valores conocidos que estuvieran por encima y debajo del rango de tolerancia deseado, en cada uno de los casos se encendía correctamente la bomba que trataría de corregir el valor medido.
- Se cargó el fermentador con agua hasta su máxima capacidad y se fijó en la interfaz gráfica diferentes valores de tolerancia máxima de oxígeno disuelto, al correr el programa de monitorización la válvula solenoide permitía el flujo de nitrógeno al interior del fermentador hasta la concentración medida alcanzara

el valor deseado. En estas mismas pruebas se comprobó el correcto encendido y apagado del motor de agitación.

Debido a limitaciones en el tiempo de desarrollo del proyecto, no se logró agregar los resultados de los experimentos llevados a cabo en el biorreactor que comprobaran la efectividad del sistema de control en una fermentación completa, sin embargo, se dejaron planteadas las pautas necesarias para la realización de ellos.

El control de una fermentación es una actividad de gran complejidad debido a la significativa variabilidad del proceso, los modelos dinámicos de este proceso indican que una gran cantidad de variables interactúan entre ellas de forma altamente no lineal, de tal manera que un control estricto del sistema implica el uso de instrumentos de gran precisión y estrategias avanzadas que incrementarían considerablemente el costo de instalación y operación, sin embargo, en el presente trabajo, se implementó un sistema que usa elementos finales de control económicos y una interfaz de usuario de fácil manipulación.

A pesar de que los actuadores no son lo más versátiles y que se implementaran estrategias independientes para cada variable, se establecieron aproximaciones para el mejoramiento del sistema de control y con ello proporcionar herramientas que permitan seguir estudiando la fermentación ABE y dar los cimientos para una producción de butanol a mayor escala aprovechando su futuro prometedor como fuente de energía ecológica.

3. CONCLUSIONES

Se instalaron los instrumentos y equipos que conformarían los lazos de control de temperatura, pH y oxígeno disuelto de un biorreactor a escala piloto-laboratorio (50 litros) para el estudio de la fermentación ABE, para su selección, se parte de aquellos que fueran económicos y compatibles con la tarjeta de adquisición de datos. A pesar de las limitaciones en el rango de acción de los elementos finales de control, se crearon estrategias que se aproximan a los métodos tradicionales de control, buscando proporcionarles a los microorganismos las condiciones óptimas para que se puedan llevar a cabo las reacciones biológicas desarrolladas en la producción de butanol a partir de glucosa.

Usando LabVIEW 2011 se configuró una interfaz gráfica de monitorización que le permite al usuario interactuar con la operación del fermentador de una forma fácil, confiable y amigable puesto que presenta las mediciones *on-line* de las variables a controlar, genera un archivo en formato *.lvm* (reproducibile en *Excel*) con los datos de las mediciones tomadas y activa los elementos finales de control por orden del usuario o en forma automática según la estrategia seleccionada para cada variable.

4. RECOMENDACIONES

El montaje del sistema piloto es la base inicial para una serie de pruebas que se realizarán en el marco del proyecto de escalamiento de sistemas fermentativos y aprovechamiento de residuos agrícolas que desarrollan el CICTA, el CEIAM y el Grupo de Investigación en Bioquímica y Microbiología; por tanto se recomienda leer detenidamente los anexos para garantizar el correcto funcionamiento de los instrumentos y la interfaz gráfica, y por ende del sistema de fermentación.

La interfaz gráfica está abierta a recibir cualquier modificación que sea pertinente bien sea para ajustar los parámetros de las estrategias que fueron establecidas o crear unas metodologías.

BIBLIOGRAFÍA

ALFARO, V. M. Actualización del método de sintonización de controladores de Ziegler y Nichols. En: Ingeniería (Costa Rica). 2005. vol. 15, no. 1-2, p. 39-52. [40]

ALFORD, Joseph S. Bioprocess control: Advances and challenges. En: Computers and chemical engineering. 2006. vol. 30, no. 10 y 12, p. 1464-1475. [10]

ARIFF, A., *et al.* Direct fermentation of gelatinized sago starch to acetone-butanol ethanol by *Clostridium acetobutylicum*. En: World Journal Microbiology & Biotechnology. 2001. vol. 17, p. 567-576. [35]

ASTRÖM, K. J. y HÄGGLUND, T. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. En: Automatica. 1984. vol 20, no. 5, p. 645–651. [39]

AUTONICS. Temperature Controller TZN4S Series, Manual. 2003. [23]

Butamax™ Advanced Biofuels LLC. Disponible en internet: <http://www.butamax.com/_assets/pdf/biobutanol_a_more_advanced_biofuel.pdf> [citado en 15 enero de 2013]. [3]

CORRIPIO, Armando B. y SMITH, Carlos A. Control automático de procesos: Teoría y práctica. México: Limusa Noriega Editores, 2006. 717 p. [8]

DAHOD, Samun K; GREASHAM, Randolph y KENNEDY, Max. Raw materials selection and medium development for industrial fermentation process. En: BALTZ, R. H.; DAVIES, J. E. y DEMAIN, A. L. Manual of Industrial Microbiology

and Biotechnology. 3 ed. American Society for Microbiology (ASM), 2010. p. 659-668. [33]

DORAN, Pauline M. Principios de Ingeniería de los Bioprocesos. Zaragoza, España: Acribia. [9]

DÜRRE, Peter. Fermentative production of butanol – the academic perspective. En: Current Opinion in Biotechnology. 2011. vol. 22, p. 331-336. [1]

FUCIÑOS, Viviana María y PALLARES, Andrea Katherine. Selección de un modelo matemático y diseño de un sistema de control para la fermentación ABE a partir de glucosa empleando *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824. Trabajo de grado Ingeniera Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química, 2011. 48 p. [5]

GARCÍA, Verónica, *et al.* Challenges in biobutanol production: How to improve the efficiency? En: Renewable and sustainable energy reviews. 2011. vol. 15, p. 964-980. [7]

GONZÁLEZ, Nancy Consuelo y ROJAS, Cindy Dayana. Diseño conceptual de un fermentador para la producción de n-butanol a partir de glucosa empleando *Clostridium Acetobutylicum* ATCC 824. Trabajo de grado Ingeniera Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química, 2011. 63 p. [12]

GREEN, Edward M. Fermentative production of butanol – the industrial perspective. En: Current Opinion in Biotechnology. 2011. vol. 22, p. 337-343. [4]

HANNA instruments. BL 931700 Panel-Mounted pH Indicators & Controllers, Instruction Manual. 2005. [24]

_____. HI 1001 Flow-thru Monitoring pH Electrode with BNC Connection and 3 m Cable. Disponible en internet: <<http://www.hannainst.com/usa/prods2.cfm?id=017014&ProdCode=HI%201001>> [Citado en 13 junio de 2013]. [29]

_____. HI 8410 Dissolved Oxygen Process Controller, Instruction Manual. 2009. [25]

HANNA instruments. HI 76409/4 Galvanic DO Probe with Protective Cap, 4 m cable. Disponible en internet: <<http://www.hannainst.com/usa/prods2.cfm?id=004003&ProdCode=HI%2076409/4>> [Citado en 13 junio de 2013]. [31]

JONES, David T. y WOODS, David R. Acetone-Butanol Fermentation Revisited. En: Microbiological review. 1986. vol. 50, no. 4, p. 484-524. [11]

KUMAR, Manish y GAYEN, kalia. Developments in biobutanol production: New insights. En: Applied Energy. 2011. vol. 88, p. 1999-2012. [2]

LAJARA VISCAÍNO, José Rafael y PELEGRÍ SEBASTIÁ, José. LabVIEW: Entorno gráfico de programación. 2 ed. México: Alfaomega, 2011. 480 p. [17]

LMI MILTON ROY. Electronic Metering Pumps, Instruction Manual. 2008. [30]

MARTÍNEZ, Guillermo Andrés y RODRIGUEZ, Carolina. Diseño y construcción de un biodigestor anaerobio de lecho fijo para operación en continuo a escala piloto con control de temperatura y pH. Trabajo de grado Ingeniero Químico.

Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química, 2007. 74 p. [16]

MEDINA CASTILLO, Henson Alberto. Diseño mecánico y construcción de biorreactor multipropósito para fermentación de glucosa a n-butano. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. [37]

MONOT, F.; ENGASSER, J. y PETITDEMANGE, H. Influence of pH and undissociated butyric acid on the production of acetone and butanol in batch cultures of *Clostridium Acetobutylicum*. En: Applied Microbiology and Biotechnology. 1984. vol. 19, no. 6, p. 422-426. [13]

NATIONAL INSTRUMENTS. NI cDAQ™-917x, User Manual: NI CompactDAQ 9171/9174/9178 USB Chassis. 2011. 135 p. [18]

_____. NI 9203, Operating Instruction and Specifications: 8-Channel, ± 20 mA, 16-Bit Analog Input Module. 2008. [20]

_____. NI 9265, Operating Instruction and Specifications: 4-Channel, 0-20 mA, 16-Bit Analog Current Output Module. 2008. [21]

_____. NI 9401, Operating Instruction and Specifications: 8-Channel, TTL Digital Input/Output Module. 2008. [19]

_____. PID VI Used for PWM Control [online]. NI Developer Community, octubre de 2010 [Citado en 25 agosto de 2013]. Disponible en internet: <<https://decibel.ni.com/content/docs/DOC-13696>> [38]

_____. ¿Qué es Adquisición de Datos? Disponible en internet: <<http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>> [Citado en 28 enero de 2013]. [27]

NI, Ye; SUN, Zhihao y WANG, Yun. Butanol production from cane molasses by *Clostridium saccharobutylicum* DSM 13864: Batch and semicontinuous fermentation. En: Applied Biochemistry and Biotechnology. 2012. vol. 166, p. 1896-1907. [34]

O'BRIEN, R. y MORRIS, J. Oxygen and the growth and metabolism of *Clostridium acetobutylicum*. En: Journal of General Microbiology. 1971. vol. 68, p. 307-318. [14]

PINTO MARIANO, Adriano, *et al.* Dynamics and control strategies for a butanol fermentation process. En: Applied biochemistry and biotechnology. 2010. vol. 160, no. 8, p. 2424-2448. [6]

ROOS, Joseph W.; MCLAUGHLIN, Joseph K. y PAPOUTSAKIS, Eleftherios. The effect of pH on nitrogen supply, cell lysis, and solvent production in fermentations of *Clostridium acetobutylicum*. En: Biotechnology and Bioengineering. 1985. vol. 27, p. 681-694. [36]

SIEMENS. Sinamics G110, Instrucciones de servicio resumidas. 4 ed. Alemania, 2004. 24 p. [22]

VELANDIA ARDILA, Claudia Marcela. Implementación de un sistema de control de pH y temperatura para un biodigestor anaerobio de lecho fijo. Trabajo de grado Ingeniera Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química, 2010. 71 p. [15]

Via Industrial. Termoresistencia PT100 con cable y bulbo. Disponible en internet: <<http://www.viaindustrial.com/producto.asp?codigo=125605>> [citado en 13 junio de 2013]. [26]

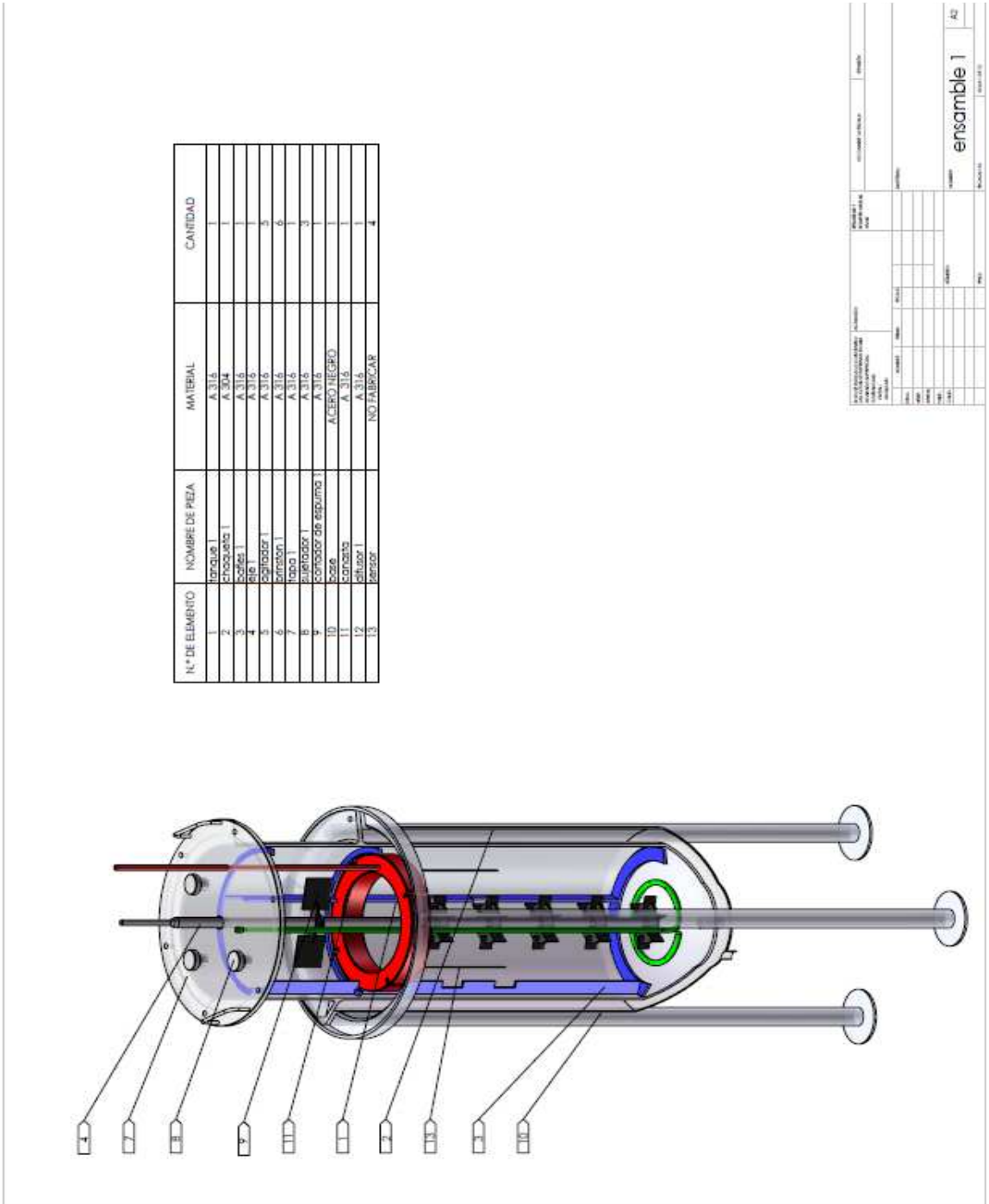
_____. Válvula solenoide uso general 2 vías Normalmente abierta 110 VAC. Disponible en internet: <http://www.viaindustrial.com/catalogos_pdf/VALVULAS/251003.pdf> [Citado en 13 junio de 2013]. [28]

Via Industrial. Válvula solenoide uso general 2 vías Normalmente cerrada 110 VAC. Disponible en internet: <http://www.viaindustrial.com/catalogos_pdf/VALVULAS/250603.pdf> [Citado en 13 junio de 2013]. [32]

ANEXOS

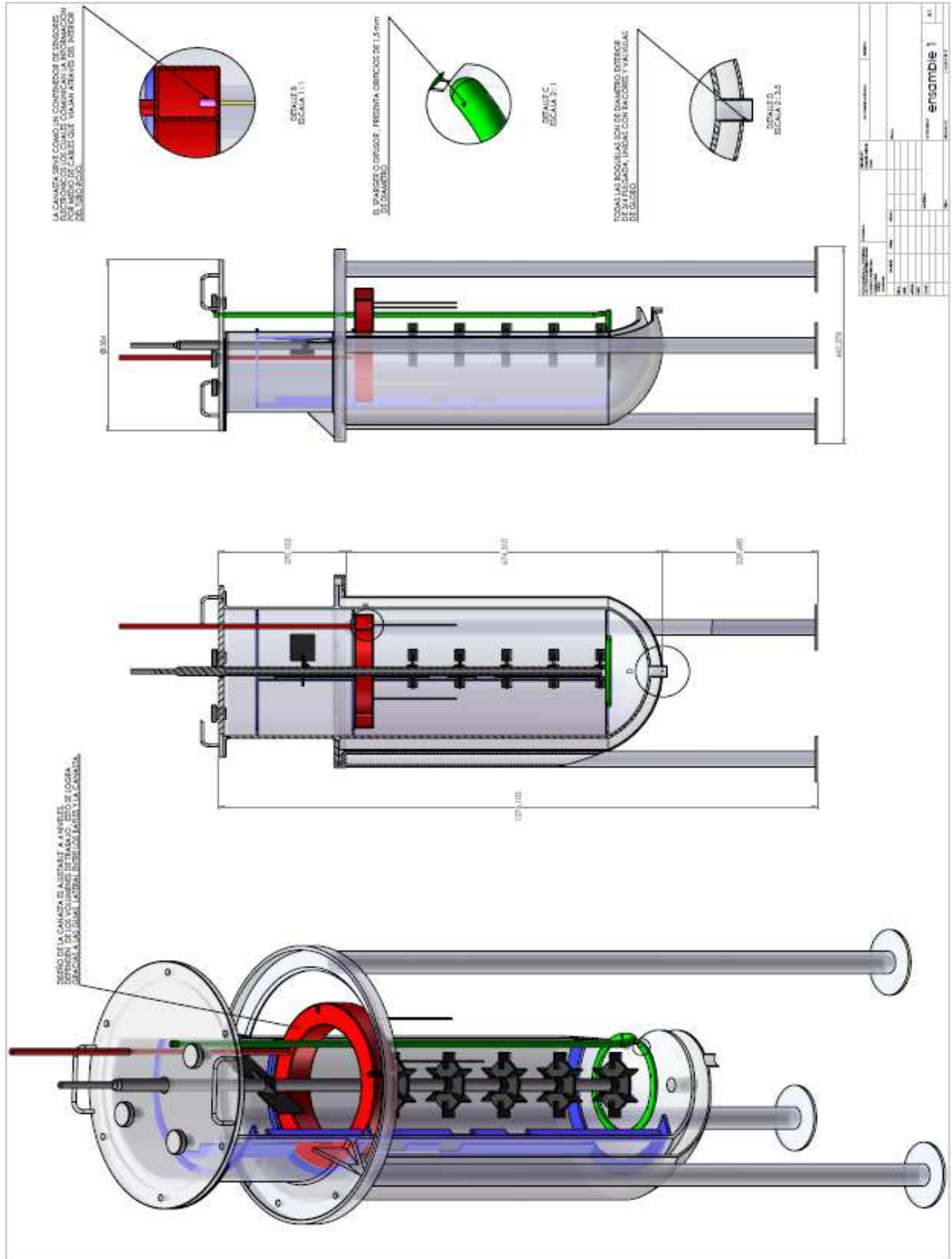
ANEXO A. PLANOS DEL FERMENTADOR Y ACCESORIOS [37]

A.1 ENSAMBLE

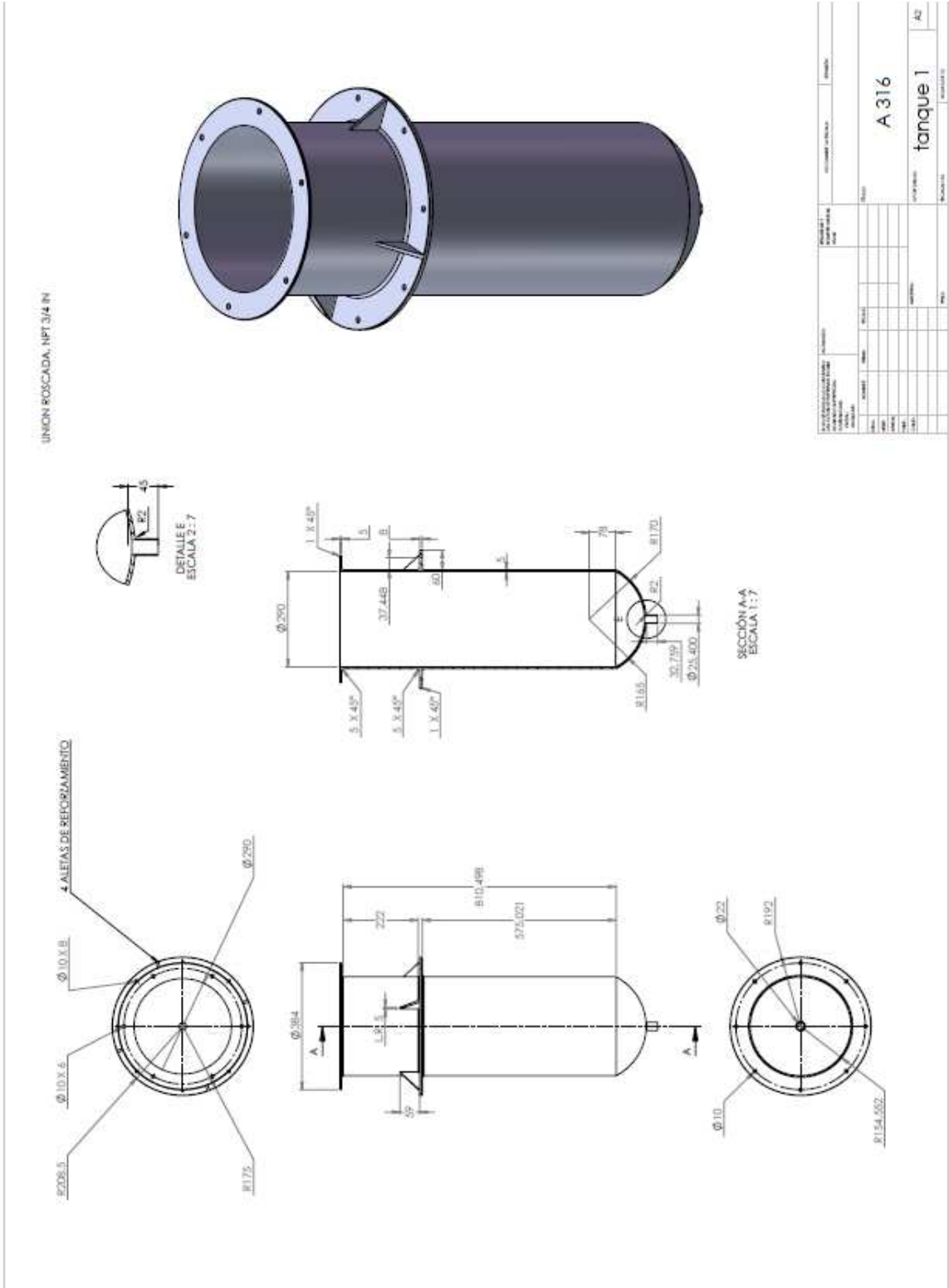


INSTITUCIÓN: DEPARTAMENTO: ASIGNATURA:		FECHA: HORARIO:	TÍTULO: ensamble 1
NOMBRE: APELLIDOS:	N.º: GRUPO:	CALIFICACIÓN: NOTA:	CALIFICACIÓN: NOTA:

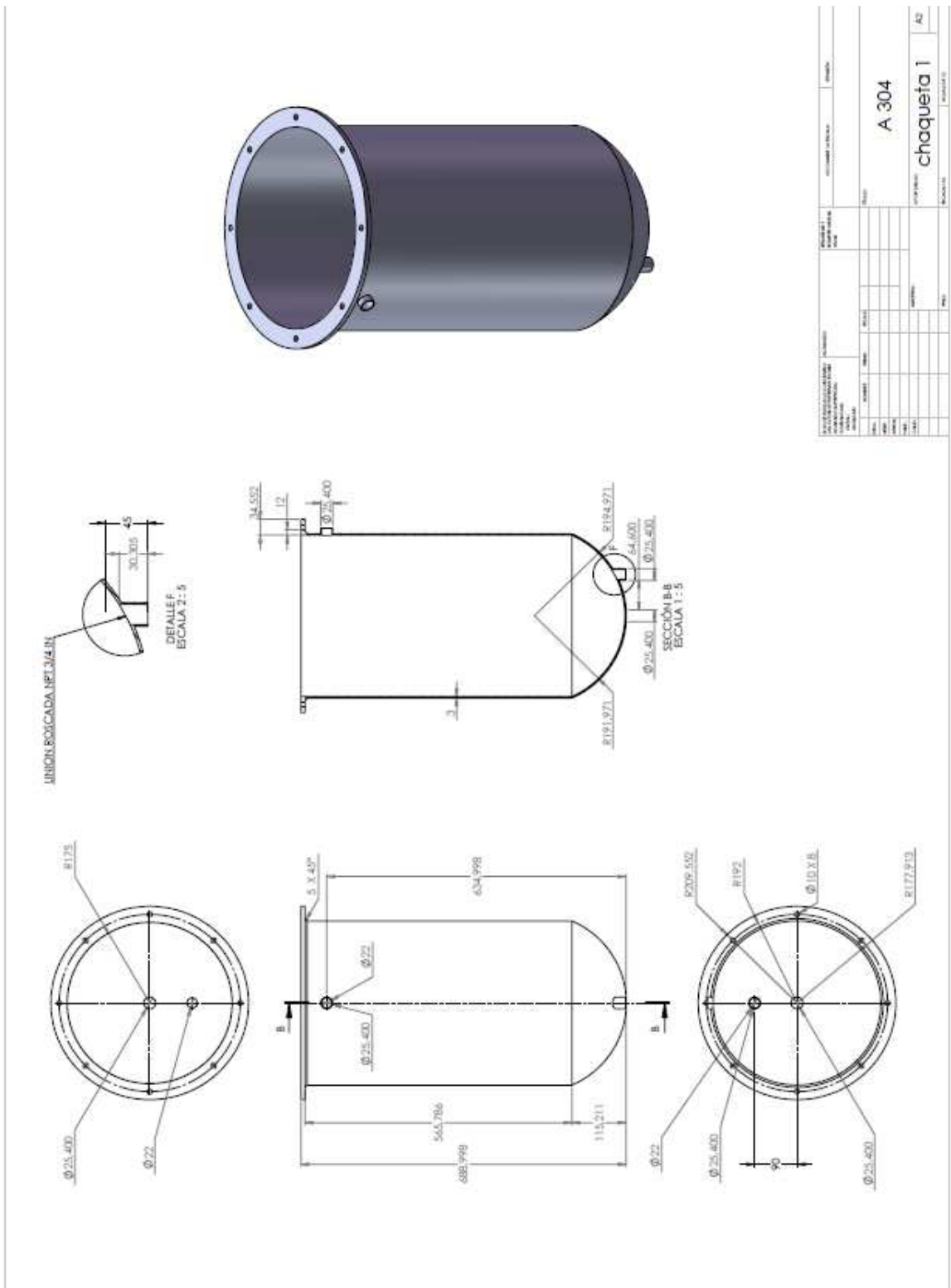
A.2 GENERAL



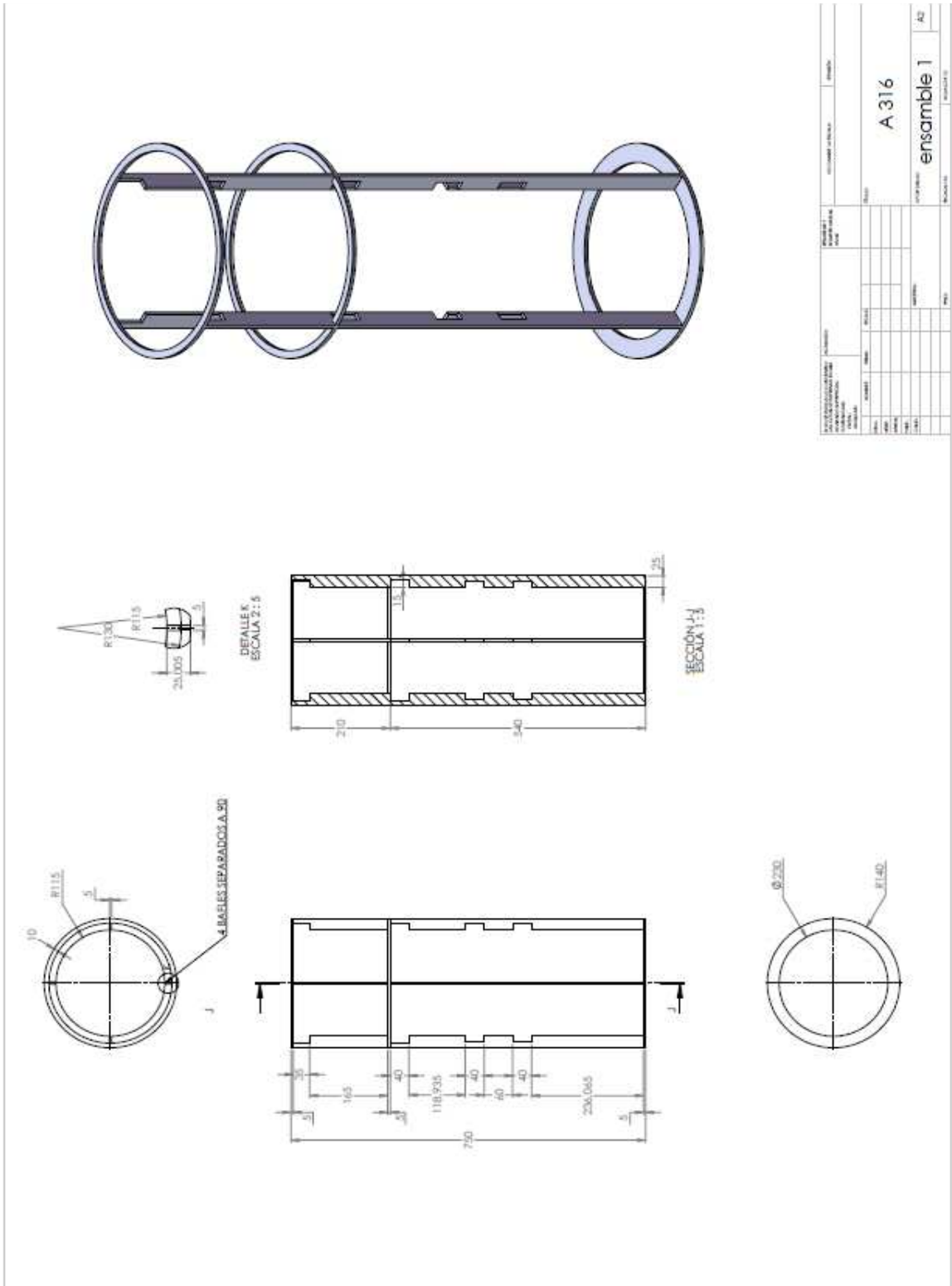
A.3 TANQUE



A.4 CHAQUETA

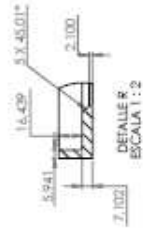
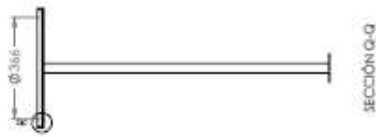
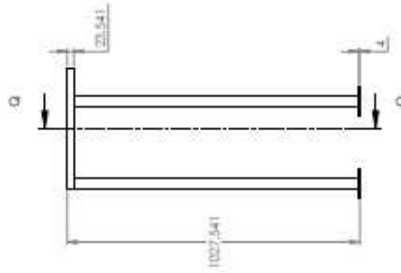
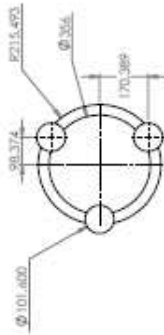


A.6 BAFLES



DATOS GENERALES DEL DISEÑO		PROYECTO		AUTOR		REVISOR		APROBADO	
NOMBRE	FECHA	NOMBRE	FECHA	NOMBRE	FECHA	NOMBRE	FECHA	NOMBRE	FECHA
TÍTULO				A 316					
DESCRIPCIÓN				ensamble 1					
MATERIAL				A2					
ESCALA				1:3					
ESTADO				DISEÑO					
AUTOR				[Blank]					
REVISOR				[Blank]					
APROBADO				[Blank]					
FECHA				[Blank]					
LUGAR				[Blank]					
OTROS DATOS				[Blank]					

A.10 BASE



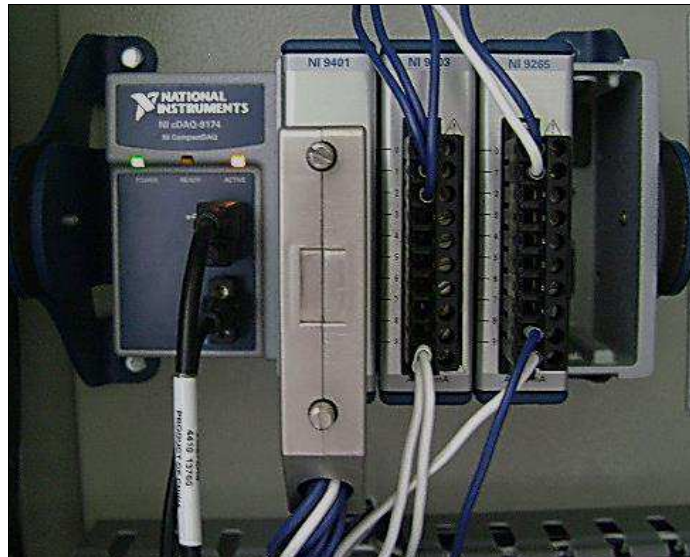
PROYECTO		FECHA		AUTOR		REVISOR	
ACERO NEGRO							
ensamble 1							
A2							

ANEXO B. DESCRIPCIÓN DE LOS SENSORES, ACTUADORES Y DEMÁS INSTRUMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL

B.1 NI *CompactDAQ* – 9174

Es un dispositivo fabricado por *National Instrument* que actúa como interfaz entre el computador y las señales de los sensores. La figura B1 muestra el *chassis* con los tres módulos empleados.

Figura B1. Tarjeta cDAQ



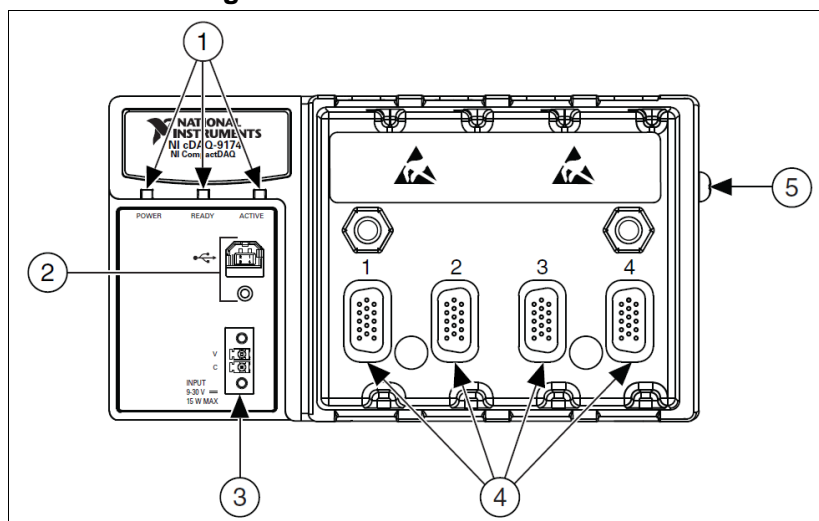
Fuente: Autor

B.1.1 *Chassis*

Es capaz de medir un amplio rango de señales análogas y digitales de entrada y salida mediante una interfaz USB 2.0 de alta velocidad. El dispositivo está acompañado con un adaptador de 110 VAC a 9-30 VDC [18].

La figura B2 presenta las partes principales del *chassis* NI cDAQ 9174 y la tabla B1 muestra el estado del *chassis* según el color de los LEDs.

Figura B2. NI cDAQ 9174 *Chassis*



Fuente: NI cDAQ™-917x, User Manual, 2011, National Instruments Corporation.

1. LEDs de estado POWER, READY y ACTIVE.
2. Conector USB con protección ante tensiones.
3. Conector de alimentación de 9 – 30 VDC.
4. Ranuras de los módulos.
5. Tornillo de conexión a tierra del *chassis*.

Tabla B1. NI cDAQ 9174 *LEDs de estado*

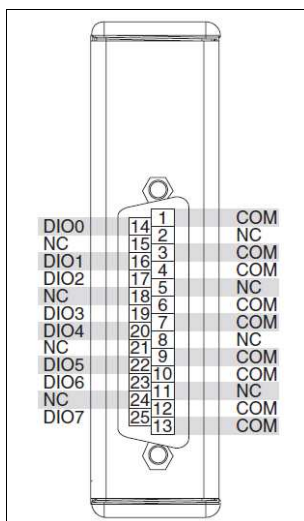
LED de estado	Color de LED		
	Apagado	Verde	Ámbar
ACTIVE	No hay comunicación USB presente/ suspendida	Comunicación USB presente	Sin configuración
READY	Conexión USB no está establecida/suspendida	Full-Speed (12 Mb/s)	Hi-Speed (480 Mb/s)
POWER	No hay potencia suministrada	Potencia suministrada	-

Fuente: NI cDAQ™-917x, User Manual, 2011, National Instruments Corporation.

B.1.2 Módulo NI 9401 de Entrada/Salida Digital (DI/O)

Tiene un conector de puerto paralelo (DSUB) de 25 pin que proporciona conexiones para 8 canales de entradas o salidas digitales.

Figura B3. Asignaciones de Pin de NI 9401



Fuente: NI 9401, Operating Instruction and Specifications, 2008, National Instruments Corporation.

Cada canal tiene un pin DIO al cual se puede conectar un dispositivo de entrada o salida digital. Los ocho canales DIO son internamente referenciados a COM. Los ocho canales también tienen protección a sobretensión, sobrecorriente y cortocircuito [19].

El tipo de salida que se genera es TTL (*Transistor-Transistor-Logic*), las señales TTL tienen dos estados, *Logic Low* y *Logic High*:

- *Logic Low* = 0 V a +0.8 V
- *Logic High* = +2 V a +5 V

Para el sistema fermentativo fueron configurados seis canales como salidas digitales y dos canales disponibles para futuras modificaciones, cada uno de los canales está conectado a un relé que activará un actuador específico, la tabla B2 indica el dispositivo que está relacionado con cada uno de los canales del módulo NI 9401.

Tabla B2. Actuadores de las salidas digitales

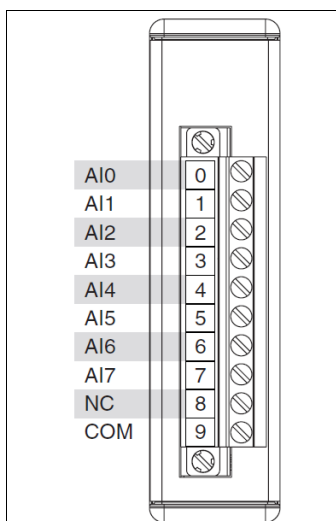
Digital Output	Actuador
0	Sin conectar
1	Sin conectar
2	Sentido de giro del motor de agitación
3	Encender convertidor del motor de agitación
4	Bomba de ácido
5	Bomba de base
6	Válvula de agua
7	Válvula de N ₂

Fuente: Autor

B.1.3 Módulo NI 9203 de entrada análoga (AI)

Tiene 10 terminales con conector de tornillo que proporciona conexiones para ocho canales de entradas análogas.

Figura B4. Asignación de terminales de NI 9203



Fuente: NI 9203, Operating Instruction and Specifications, 2008, National Instruments Corporation.

Cada canal tiene un terminal AI al cual se puede conectar una señal de corriente. El NI 9203 también tiene un terminal común, COM, que es internamente conectado a la referencia de tierra del módulo. La señal de entrada es

almacenada, acondicionada y muestreada por un convertidor análogo-digital (ADC) de 16 bit. La entrada nominal es de 0 a 20 mA [20].

Las entradas análogas que fueron configuradas para cada variable de proceso medible se presentan a continuación:

Tabla B3. Entradas análogas

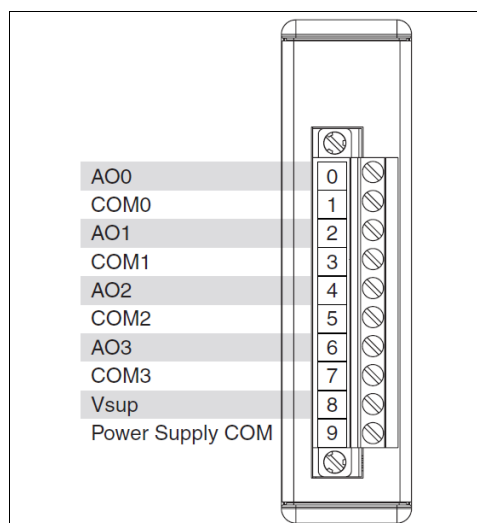
Analog Input	Variable de Proceso
0	Temperatura
1	Oxígeno disuelto
2	pH

Fuente: Autor

B.1.4 Módulo NI 9265 de salida análoga (AO)

Tiene 10 terminales, con conector de tornillo que proporciona conexiones para cuatro canales de salidas análogas.

Figura B5. Asignación de terminales de NI 9265



Fuente: NI 9265, Operating Instruction and Specifications, 2008, National Instruments Corporation.

Cada canal tiene un terminal común, COM, que es internamente conectado a la referencia de tierra del módulo. El NI 9265 también tiene un terminal para un

suministro de potencia externo, V_{sup} , y un terminal común para suministro de potencia externo, *Power Supply COM*.

Cada canal AO tiene un convertidor digital-análogo (DAC) que produce una señal de corriente. Cada canal también tiene protección de sobretensión y corto-circuito. Rango de salida de 0 a 20 mA [21].

El canal de salida análogo que fue configurado para la presente aplicación replica la señal de corriente proveniente del sensor de temperatura para mostrar su valor en el controlador TZN4S del tablero de control.

B.2 SENSORES

B.2.1 Termoresistencia Pt-100

Dispositivo termo resistivo (RTD) con bulbo en acero inoxidable 304, posee en su interior un componente resistivo de platino de 100 Ω (Pt-100) a 0 °C. La longitud del bulbo es de 5 cm, diámetro de 4 mm, conexión de 3 hilos [26].

Figura B6. Pt-100



Fuente: Termoresistencia PT100 con cable y bulbo
<<http://www.viaindustrial.com/producto.asp?codigo=125605>>

B.2.2 Electrodo de pH

Marca *HANNA Instruments*, serie 1001, con cuerpo de PVDF, tecnología de doble junta, longitud de 8,6 cm y con conexión NPT de 3/4" para instalación en línea [29].

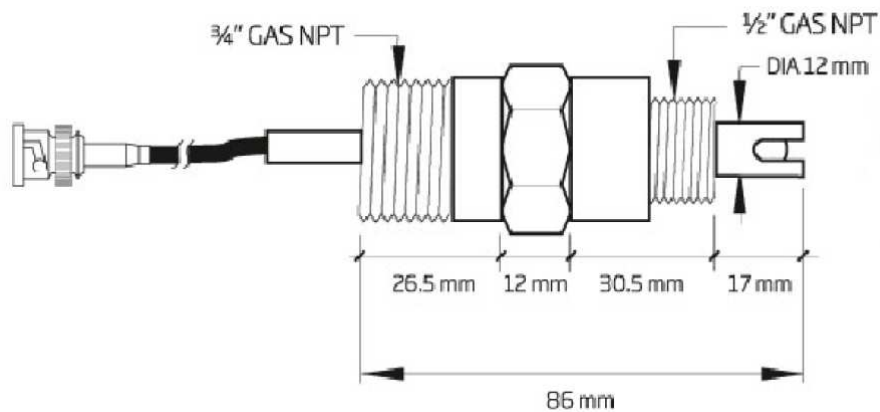
Figura B7. Electrodo de pH



Fuente: HI 1001 Flow-thru Monitoring pH Electrode with BNC Connection and 3 m Cable
<<http://www.hannainst.com/usa/prods2.cfm?id=017014&ProdCode=HI%201001>>

El electrodo genera una diferencia de potencial a través del bulbo de vidrio entre el electrolito de polímero del interior y el medio de fermentación, potencial que es sensible a los cambios en la actividad del ión hidrógeno en el medio de cultivo.

Figura B8. Dimensiones del electrodo de pH



Fuente: HI 1001 Flow-thru Monitoring pH Electrode with BNC Connection and 3 m Cable
<<http://www.hannainst.com/usa/prods2.cfm?id=017014&ProdCode=HI%201001>>

Incorpora un conector BNC y cable de 3 m de longitud, soporta temperaturas entre -5°C a 80°C y una presión máxima de 6 bar.

Almacenamiento:

- Para minimizar la obstrucción y asegurar una respuesta rápida, el bulbo de vidrio debe mantenerse húmedo y no permitir que se seque.
- Reemplazar la solución de la tapa protectora con agua por periodos cortos de tiempo (par de días).
- NUNCA ALMACENAR EL ELECTRODO EN AGUA DESTILADA.

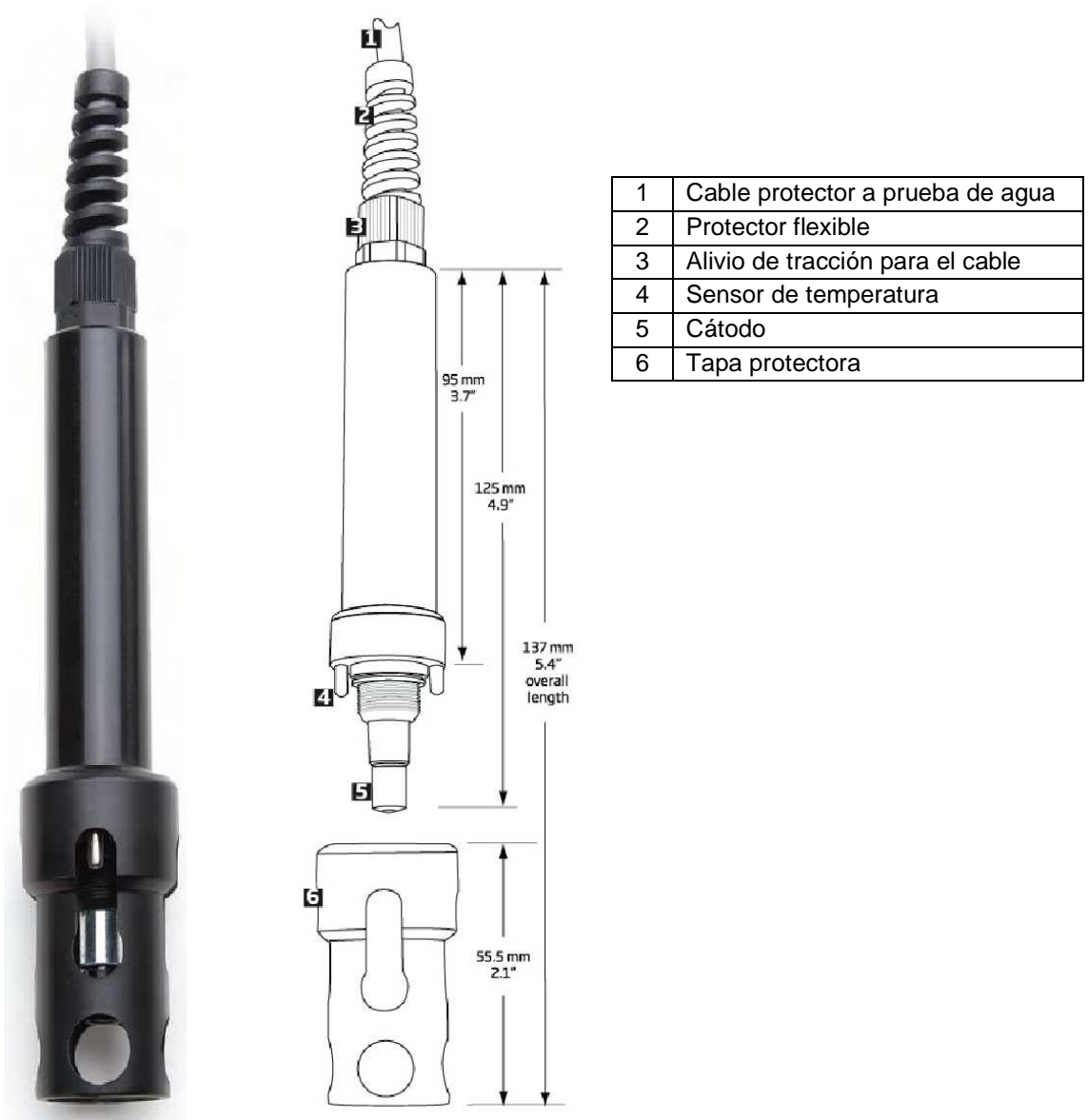
Mantenimiento:

- Enjuagar la punta del electrodo con agua destilada antes y después de cada medición.
- Inspeccionar el electrodo verificando que esté libre de cualquier rayón o grieta, si alguna está presente, se debe reemplazar el electrodo.
- Enjuagar los depósitos de sal con agua.

B.2.3 Sonda de oxígeno disuelto

Sonda galvánica marca *HANNA Instruments*, serie 76409/4, con cuerpo de polímero, longitud de 13,7 cm, diámetro de 2,1 cm, posee una tapa rellena con solución electrolítica que entra en contacto con 2 electrodos sólidos, en la punta de la tapa se tiene una membrana de PTFE selectiva que permite la difusión de O₂ del medio de fermentación hacia la solución electrolítica y causa un flujo de corriente eléctrica proporcional a la concentración de O₂ disuelto [31]. En la figura B9 se presentan las partes principales de la sonda y sus dimensiones.

Figura B9. Dimensiones de la sonda de oxígeno disuelto



Fuente: HI 76409/4 Galvanic DO Probe with Protective Cap, 4 m cable.
 <<http://www.hannainst.com/usa/prods2.cfm?id=004003&ProdCode=HI%2076409/4>>

Preparación de la sonda

Para una operación correcta de la sonda, es recomendable reemplazar la membrana cada dos meses y la solución electrolítica cada mes [25].

1. Remover de la punta de la sonda la tapa de rosca con membrana (como la mostrada en la figura B10) en sentido anti horario.

Figura B10. Tapa de rosca con membrana

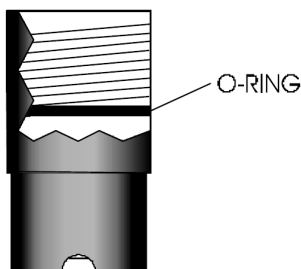


Fuente: HI 76409A/P Membranes for DO Probes.

<http://www.hannainst.com/usa/prods2.cfm?id=004003&ProdCode=HI%2076409A/P>

2. Insertar el *O-ring* en una membrana nueva.

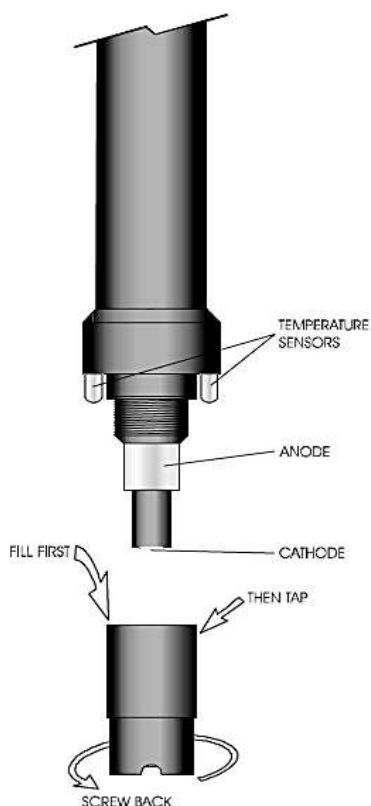
Figura B11. *O-ring*



Fuente: HI 8410 Dissolved Oxygen Process Controller, Instruction Manual, 2009, Hanna Instruments

3. Rellenar la membrana con solución electrolítica mientras se agita suavemente. Golpear suavemente la tapa de la membrana sobre una superficie para asegurar que no queden burbujas de aire atrapadas. Evitar daños sobre la membrana y no tocar con los dedos.
4. Con el sensor boca abajo ajustar la tapa en sentido horario hasta el final de la rosca. Un poco de solución electrolítica se desbordará.

Figura B12. Ajuste de la membrana



Fuente: HI 8410 Dissolved Oxygen Process Controller, Instruction Manual, 2009, Hanna Instruments.

B.3 CONTROLADORES

B.3.1 Controlador de Temperatura TZN4S

Marca *Autonics*, recibe señales de termocuplas, RTD o analógicas (corriente: 4-20 mA, voltaje: 1-5 VDC), tiene un *display* doble de cuatro dígitos (Valor de Proceso PV: Rojo, Valor de Ajuste SV: Verde), fuente de alimentación conmutada de 100 a 240 VAC, resolución de 0,1°C y precisión de $\pm 3\%$ de lectura, dimensiones de 48 x 48 mm, salida en corriente de 4 a 20 mA [23].

Figura B13. Controlador de Temperatura TZN4S



Fuente: Controlador de temperatura, serie TZN, Autonics,
<http://autonics.com.mx/products/products_detail.php?catecode=02/01/01&db_uid=28>

B.3.2 Minicontrolador de pH BL 931700

Marca *Black Stone*, es un indicador y controlador para montaje en panel, con conexión BNC para electrodos de pH y mediciones en el rango de 0 a 14 con una resolución de 0,01 pH, precisión (a 20 °C) de $\pm 0,02$ pH [24].

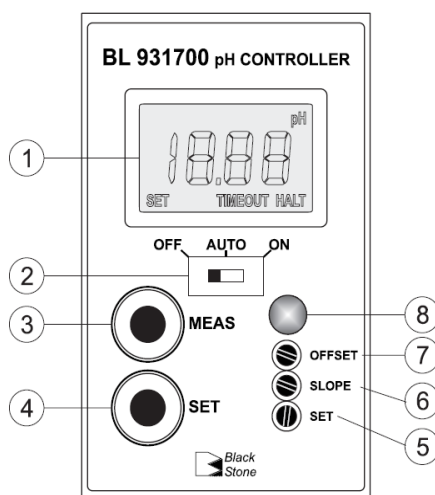
Figura B14. Minicontrolador de pH BL 931700



Fuente: Minicontrolador de pH con salida de Registrador 4-20 mA, Hanna Instruments.
<<http://www.hannachile.com/productos/mini-controladores/mini-controlador-de-ph-con-salida-de-registrador-4-20-ma>>

Dispone de una salida analógica de 4 a 20 mA, y un adaptador para alimentación de 115/230 VAC. Dimensiones de 83 x 53 x 99 mm. Está dotado de un punto de consigna con selección de dosificación ácida o alcalina. En la figura B15 se presentan las partes del panel frontal del minicontrolador de pH.

Figura B15. Panel frontal de minicontrolador de pH



Fuente: Panel-Mounted pH Indicators & Controllers, BL 931700, Instruction Manual, 2005, Hanna Instruments.

- (1) Pantalla de cristal líquido
- (2) Selector del tipo de control:
 - OFF = sin dosificación
 - Auto = dosificación automática, dependiendo del valor de *set point* y la selección de dosificación
 - ON = dosificación siempre activa
- (3) “MEAS” botón para ajustar el instrumento en el modo de medición.
- (4) “SET” botón para mostrar y ajustar el valor de *set point*
- (5) “SET” potenciómetro para ajustar el valor de *set point* (0 a 14)
- (6) “SLOPE” potenciómetro para ajustar el valor de pendiente de pH durante la calibración
- (7) “OFFSET” potenciómetro para ajustar el valor de compensación de pH durante la calibración

(8) Indicador LED de 3 colores:

- Verde = equipo en modo de medición
- Naranja/Amarillo = dosificación en progreso
- Rojo, intermitente = indica una condición de alarma

Preparación

Antes de proceder asegurarse que:

- El medidor está calibrado.
- Todas las conexiones del panel posterior son correctas.
- El selector OFF/Auto/ON está en la posición deseada.

Sumergir el electrodo en la solución a ser monitoreada, luego presionar el botón "MEAS". La pantalla LCD mostrará el valor de pH. El indicador LED encenderá en color verde cuando el equipo está en modo de medición y la dosificación no está activa, mientras que el LED será de color Naranja/Amarillo cuando la acción de dosificación está en progreso.

EN LA PRESENTE APLICACIÓN EL SELECTOR SE DEBE AJUSTAR EN LA POSICIÓN OFF PARA PERMITIR QUE LA ORDEN DE DOSIFICACIÓN SEA REALIZADA POR EL COMPUTADOR.

Calibración

Con el equipo en modo de medición, sumergir el electrodo en solución buffer de pH $7\pm 0,01$, agitar brevemente y esperar que la lectura se estabilice. Ajustar el potenciómetro OFFSET (ver figura B16) hasta que se muestre un valor de $7\pm 0,01$ para el pH en la pantalla LCD.

Enjuagar el electrodo, luego sumergirlo en solución buffer de pH $4\pm 0,01$, agitar brevemente y esperar que la lectura se estabilice. Ajustar el potenciómetro SLOPE hasta que $4\pm 0,01$ pH sea mostrado en el LCD.

B.3.3 Controlador/Indicador de Oxígeno Disuelto HI 8410

Marca *Hanna Instruments*, indica el oxígeno disuelto en mg/l (ppm) o en % de saturación. Utiliza sondas galvánicas y realiza compensación automática de oxígeno disuelto por efectos de la temperatura sobre la solubilidad de oxígeno y permeabilidad de la membrana [25].

Figura B16. Controlador de Oxígeno Disuelto HI 8410



Fuente: Minicontrolador de oxígeno disuelto, HI 8410, Hanna Instruments.
<<http://www.hannainst.es/catalogo/index.php?pg=9&Familia=2541&Familia2=2542&CodProducto=778>>

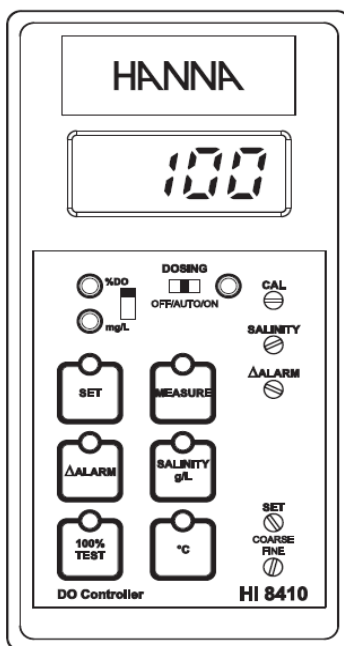
La tabla B4 presenta algunas especificaciones del controlador HI 8410 y la figura B17 muestra los diferentes botones del panel frontal.

Tabla B4. Especificaciones controlador HI 8410

Especificaciones	HI 8410
Rango	0 a 50 mg/l (ppm) O ₂ 0 a 600 % O ₂ -5 a 50 °C
Resolución	0,1 mg/l o 1% (O ₂) / 0,1 °C
Precisión (a 20 °C)	±1% de lectura (O ₂) / ±0,2 °C
Compensación de temperatura	Automática, de -5 a 50 °C
Compensación de Salinidad	0 a 51 g/l (resolución 1 g/l)
Salida analógica	0 a 20 mA o 4 a 20 mA
Alimentación	115 o 230 VAC

Fuente: HI 8410 Dissolved Oxygen Process Controller, Instruction Manual, 2009, Hanna Instruments.

Figura B17. Panel frontal controlador HI 8410



Fuente: HI 8410 Dissolved Oxygen Process Controller, Instruction Manual, 2009, Hanna Instruments.

Teclado

MEASURE	Leer la medición y habilitar el test de diagnóstico
ΔALARM	Mostrar y ajustar la tolerancia de la alarma
SET	Mostrar y ajustar el punto de trabajo de dosificación
SALINITY g/L	Mostrar y ajustar el factor de salinidad (activo solo en el modo de mg/L)
CAL	Entrar en modo de calibración
100% TEST	Función de diagnóstico
°C	Mostrar la lectura de temperatura

Al pulsar una de las teclas, el LED correspondiente se iluminará indicando que la función esta activa.

Potenciómetros

CAL	Para calibración de 100% OD
SALINITY	Ajustar la concentración de salinidad (g/l)

ΔALARM	Ajustar la tolerancia de alarma
SET COARSE	Ajustar aproximadamente el <i>set point</i>
SET FINE	Ajustar exactamente el <i>set point</i>

LEDs

% DO	Indica si la medición se encuentra en modo % de saturación
mg/L	Indica si la medición se encuentra en modo mg/l
SET	Indica si la dosificación esta activa
ΔALARM	Indica una condición de alarma
DOSAGE MODE SWITCH	Indica si se ha seleccionado el modo continuo ON u OFF en el interruptor de dosificación

Interruptores

OFF/AUTO/ON Seleccionar el modo de dosificación:

- **OFF** = Dosificación deshabilitada
- **AUTO** = Dosificación automática, dependiendo del *set point* y el valor leído
- **ON** = Dosificación siempre activa

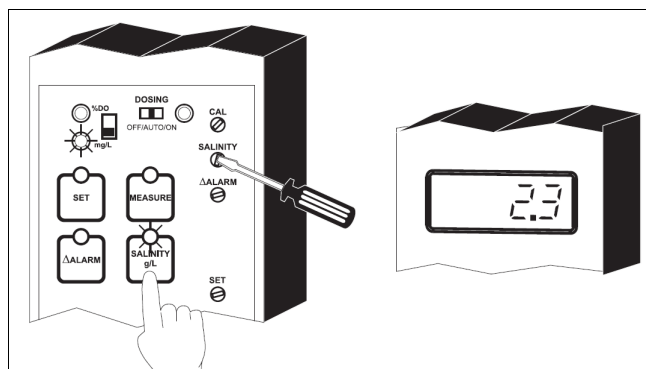
EN LA PRESENTE APLICACIÓN EL INTERRUPTOR SE DEBE AJUSTAR EN LA POSICIÓN OFF PARA PERMITIR QUE LA ORDEN DE DOSIFICACIÓN SEA REALIZADA POR EL COMPUTADOR.

Preparación del controlador

• **Ajuste de salinidad g/l**

Las mediciones de oxígeno disuelto pueden ser compensadas por concentraciones de salinidad y este valor de corrección puede ser ajustado por el usuario. Seleccionar el modo mg/l usando el puente correspondiente en el panel posterior. Presionar la tecla SALINITY g/l, usar un pequeño destornillo y ajustar el potenciómetro SALINITY (ver figura B18), la pantalla mostrará el valor de salinidad en el rango de 0 a 51 g/l.

Figura B18. Ajuste de salinidad



Fuente: HI 8410 Dissolved Oxygen Process Controller, Instruction Manual, 2009, Hanna Instruments.

- **Compensación de altitud**

Cuando la compensación de salinidad no es requerida, el potenciómetro SALINITY puede ser usado para corregir el valor por altitud. Entrar al modo mg/l. Presionar el botón SALINITY g/l. Girar el potenciómetro SALINITY para mostrar el valor correspondiente a la altitud deseada, ver la tabla B5 como referencia.

Tabla B5. Compensación de altitud

Altitud (m)	g/L
250	6
500	11
750	17
1000	22
1250	26
1500	31
1750	36
2000	40

Fuente: HI 8410 Dissolved Oxygen Process Controller, Instruction Manual, 2009, Hanna Instruments.

EN LA PRESENTE APLICACIÓN NO SE REQUIEREN AJUSTES DE SET POINT Y ALARMA

Calibración del controlador

La calibración se realiza a un solo punto, en aire y solo en el modo de % DO.

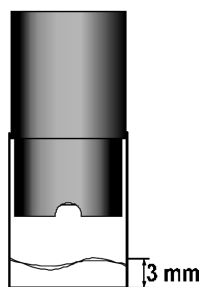
Asegurarse que la sonda esta lista para la medición (membrana llena de solución electrolítica).

Si el equipo está ajustado en el modo de medición de % DO, simplemente girar el potenciómetro CAL hasta mostrar 100%.

Si el equipo está ajustado en el modo de medición de mg/L, mantener presionada la tecla CAL para entrar en el rango de %DO y girar el potenciómetro CAL hasta mostrar 100%, al dejar de presionar la tecla CAL el equipo regresará al rango de mg/l.

Si la humedad relativa del ambiente es inferior a 30%, agregar un poco de agua desionizada en la tapa blanca suministrada con las membranas (ver figura B19). Insertar la sonda en la tapa y calibrar. Mantenga la sonda en posición vertical para evitar cualquier contacto de la membrana con el agua.

Figura B19. Calibración del controlador



Fuente: HI 8410 Dissolved Oxygen Process Controller, Instruction Manual, 2009, Hanna Instruments.

Para mejorar la exactitud, la calibración debe hacerse en el mismo lugar de medición, y la sonda debe estar a la misma temperatura del aire.

Después de reemplazar la membrana o la solución electrolítica de la sonda, esperar unos minutos para que la lectura se estabilice.

Prueba de diagnóstico

Antes de iniciar el diagnóstico, presionar la tecla "MEASURE", en seguida, mantener presionado la tecla CAL y luego presionar la tecla 100% TEST, la pantalla deberá indicar un valor entre 30% y 200% DO.

B.4 ACTUADORES

B.4.1 Válvula Solenoide de Agua

Marca *UNI-D*, modelo UW-10, normalmente abierta, requiere alimentación de 110 VAC, tiene cuerpo de bronce, conexión a tubería NPT de 3/8", orificio interno de 15 mm de diámetro, coeficiente de flujo C_v de 2,4, trabaja con fluidos con una temperatura entre $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, soporta presiones entre 0 y 5 bar para agua y aceites ligeros y de 0 a 7 bar para gases [28].

Figura B20. Válvula solenoide de agua



Fuente: Autor

B.4.3 Bombas dosificadoras de ácido y base

Marca *LMI Milton Roy*, serie AA751, son bombas de desplazamiento positivo impulsadas por un diafragma o *Liquifram*TM, El volumen de salida puede ser ajustado en un rango de cero a 1,0 GPH (galones por hora) y la presión de inyección generada es de máximo 110 psi [30].

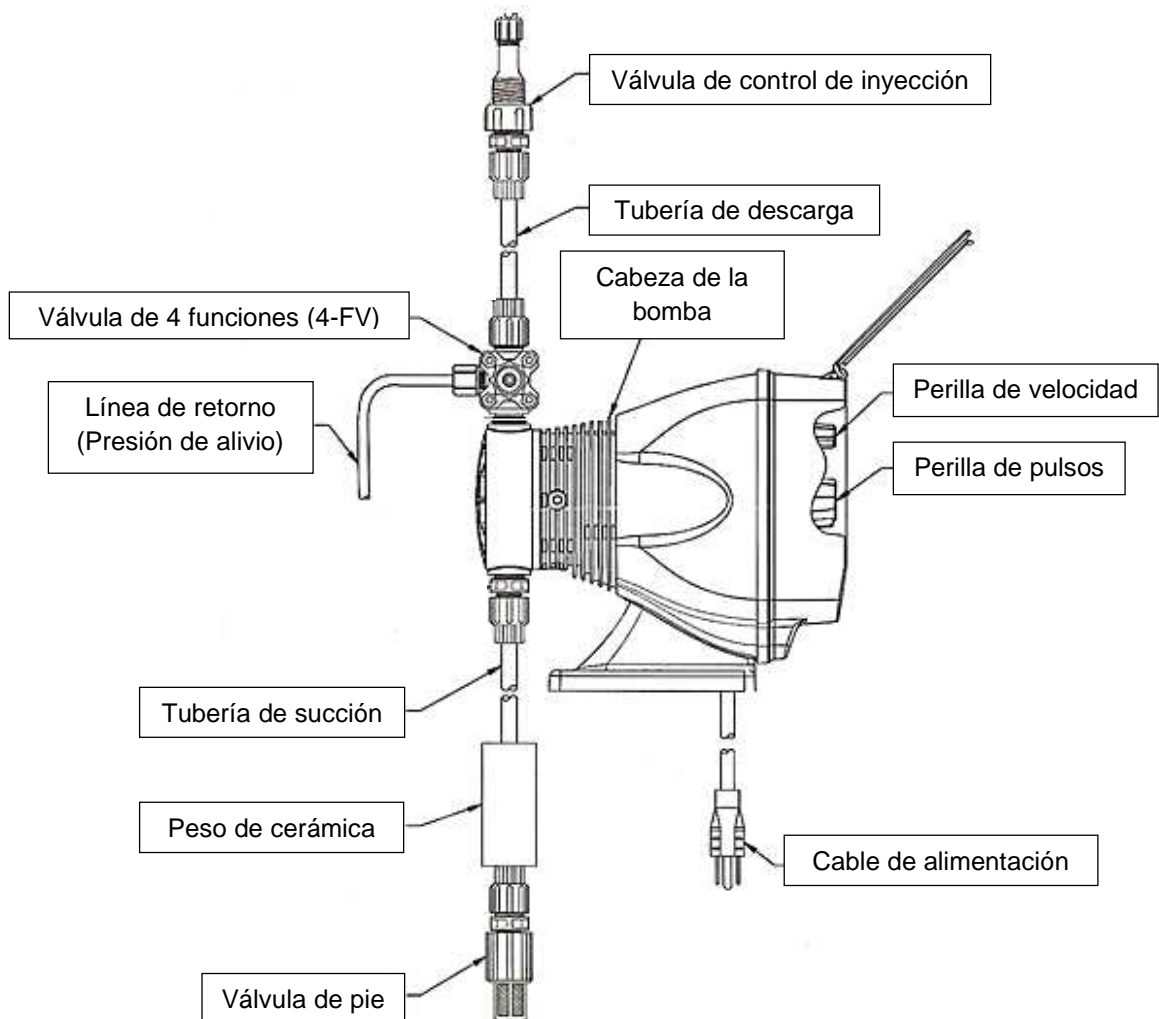
Figura B21. Bombas dosificadoras



Fuente: Autor

La figura B22 presenta los componentes de la bomba dosificadora.

Figura B22. Componentes de la bomba



Fuente: Electronic Metering Pumps, Instruction Manual, 2008, LMI Milton Roy.

Instrucciones de Pre-Instalación

- Todas las bombas LMI son preparadas con agua desde la fábrica. Si la solución a trabajar no es compatible con agua, es necesario desensamblar la cabeza de la bomba, secar completamente la cabeza, las válvulas, anillos, diafragma. Re-ensamblar la cabeza y rellenar con la solución a bombear.
- El tamaño de las tuberías de entrada o salida no debe reducirse. Revisar que todas las conexiones de tuberías estén correctas antes de la puesta en marcha.

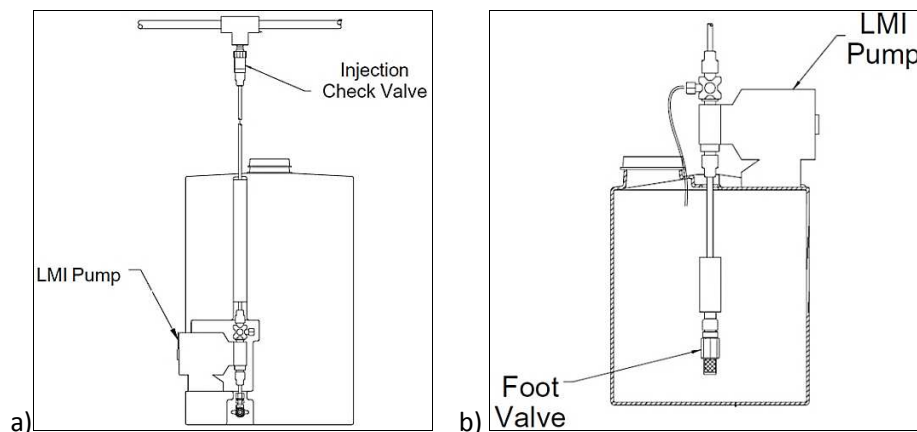
- Todos los accesorios deben ser apretados con la mano. Adicionar 1/4 a 1/8 de giro después de que el accesorio haga contacto con el anillo de selle. El uso de llaves puede causar daños en los accesorios. No usar cinta de teflón para sellar roscas.
- Si la operación se realiza en pendiente o en sistema de baja presión, un dispositivo contrapresión/anti-sifón tal como la válvula de 4 funciones (4-FV) debe ser instalada para prevenir bombeo excesivo o sifonaje.
- No usar adaptadores eléctricos. Sólo usar puertos con polo a tierra.

Montaje de la bomba

El montaje se puede dar de 2 formas (ver figura B23):

- **Succión positiva:** (Instalación recomendada) La bomba es montada en la base del tanque de almacenaje, de esta forma se previenen más problemas y es recomendable para salidas muy bajas, soluciones gasificadas y soluciones de alta viscosidad.
- **Succión de altura:** La altura de succión debe ser menor a 1.5 metros (5 pies) para soluciones con gravedad específica como la del agua. LA POSICIÓN DE LA CABEZA DE LA BOMBA Y LOS ACCESORIOS NUNCA DEBEN ESTAR EN POSICIÓN HORIZONTAL. El montaje se puede realizar con un soporte para montaje en pared, sobre el tanque de solución o sobre un estante.

Figura B23. Montaje de la bomba: a) succión positiva, b) succión de altura

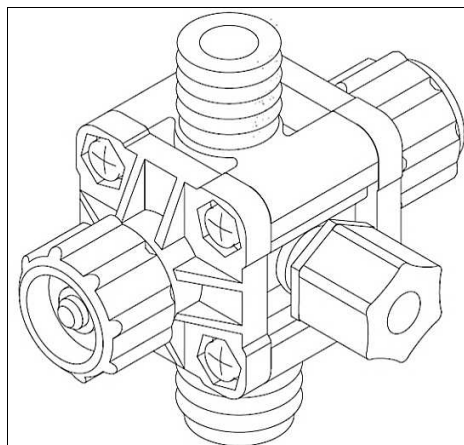


Fuente: Electronic Metering Pumps, Instruction Manual, 2008, LMI Milton Roy.

Válvula de 4 funciones (4-FV)

- **Alivio de presión:** Si la línea de descarga está presurizada, la válvula se abre enviando solución de regreso al tanque de suministro.
- **Línea de despresurización:** Abriendo la perilla de alivio proporciona drenaje de regreso al tanque de suministro.
- **Antisifón:** Previene el sifonaje cuando se bombea solución en pendiente o en vacío.
- **Presión de retorno:** suministra aproximadamente 25 psi de contrapresión para prevenir bombeo excesivo cuando no se presenta sistema de presión de retorno.

Figura B24. Válvula 4-FV



Fuente: Electronic Metering Pumps, Instruction Manual, 2008, LMI Milton Roy.

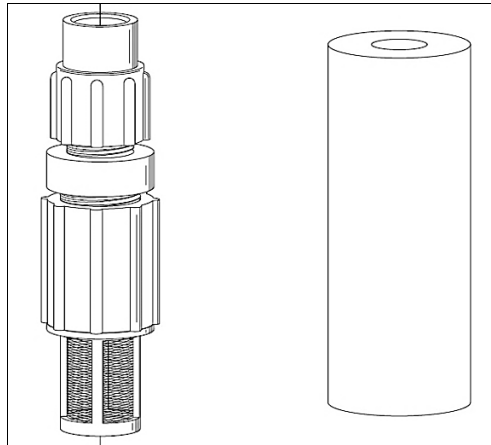
Válvula de succión

La válvula de pie actúa como válvula de chequeo para mantener la bomba iniciada en aplicaciones de succión elevada.

La válvula de pie es diseñada para ser sumergida en el tanque de solución y debe colocarse en posición vertical. Su posición es aproximadamente de 2 pulgadas (5 cm) por encima del fondo si el tanque contiene sedimentos.

El peso de cerámica, cuando es instalado, posiciona a la válvula de pie en forma vertical.

Figura B25. Válvula de pie y peso de cerámica

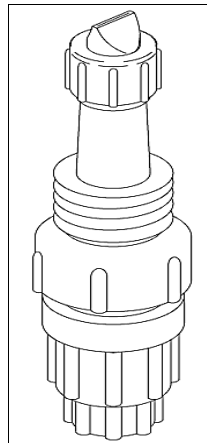


Fuente: Electronic Metering Pumps, Instruction Manual, 2008, LMI Milton Roy.

Válvula de control de inyección

Previene el flujo de retorno desde una línea de tratamiento. Después de cortar una longitud de tubería apropiada y conectar los extremos a sus entradas correspondientes, asegurarse de no aplastar o hacer contacto con superficies calientes o filosas.

Figura B26. Válvula de control de inyección



Fuente: Electronic Metering Pumps, Instruction Manual, 2008, LMI Milton Roy.

Controles de ajuste de salida

- **Ajuste de velocidad (perilla superior):** El control de velocidad proporciona el ajuste de porcentaje de pulsos máximos por minuto. Girando la perilla en sentido del reloj se incrementa la frecuencia de pulsos (velocidad).
- **Ajuste de pulsos (perilla inferior):** El control de pulsos proporciona el ajuste de porcentaje máximo de solución descargada durante cada actuación de la bomba. Girando la perilla en sentido del reloj incrementa la solución desplazada.

Inicio/preparación de la bomba

Revisar que las medidas de precaución han sido tomadas, la bomba está montada y la tubería está conectada.

1. Conectar o encender la bomba
2. Mientras la bomba está trabajando, fijar la perilla de velocidad al 80% y la perilla de pulso al 100%
3. Abrir 1/4 de giro el punto de alivio (perilla negra) de la válvula multifunción.
4. La tubería de succión debe empezar a llenarse con solución desde el tanque.
5. Una pequeña cantidad de solución se empezará a descargar a la línea de retorno de la válvula multifunción. Una vez esto suceda, girar 1/4 o liberar la perilla de la válvula multifunción y apagar la bomba.
6. La bomba está ahora preparada.
7. Proceder a ajustar los controles de salida.

Salida Total de la Bomba

El cálculo de salida total es de la siguiente forma:

$$**PUMP OUTPUT = MAX PUMP OUTPUT * \%SPEED * \%STROKE**$$

Ejemplo:

La salida máxima (se encuentra en la placa de datos del panel de control de la bomba) es de 24 GPD (galones por día).

Si la bomba está fijada en 60% de velocidad y 70% de pulso, la salida aproximada de la bomba es: $24 \times 0,6 \times 0,7 = 10,08$ GPD.

Calibración

Una vez la instalación es completa, la bomba debe ser calibrada ajustando las perillas de velocidad y pulsos para una salida deseada.

1. Asegurar que la bomba está preparada, la tubería de descarga y la válvula de control de inyección han sido instaladas para un servicio normal.
2. Colocar la válvula de pie en un recipiente graduado con un volumen de 1000 ml o más.
3. Encender la bomba. Bombear hasta que todo el aire se ha agotado en la línea de succión y en la cabeza.
4. Apagar la bomba. Volver a llenar el recipiente graduado a un nivel de punto de partida.
5. Usando un cronómetro, encender la bomba por un cierto tiempo (mínimo 50 pulsos).
6. Apagar la bomba. Tener en cuenta el tiempo transcurrido en relación al volumen desplazado en el recipiente. Calcular la salida en las unidades de tiempo deseadas (minutos, horas, días, etc.).
7. Si la salida es demasiada baja o alta, ajustar la velocidad o los pulsos, estimando la corrección requerida y repetir los pasos 1-7.

Despresurización de la línea de descarga

- Asegurar que la válvula de control de inyección este instalada apropiadamente. Si una válvula de cierre ha sido instalada corriente abajo de la válvula de inyección, ésta debe ser cerrada.
- Asegurar que la tubería de alivio esté conectada a la válvula multifunción.
- Girar 1/4 la perilla negra de la válvula. La línea de descarga está ahora despresurizada. Mantenga la válvula abierta hasta que la solución drene hacia abajo de la tubería de descarga al tanque de suministro. Luego, girar la perilla 1/4 a la posición normal.

B.4.2 Válvula Solenoide de Nitrógeno

Marca *UNI-D*, modelo UD-8, normalmente cerrada, requiere alimentación de 110 VAC, con cuerpo de bronce, conexión a tubería NPT de 1/4", orificio interno de 2,5 mm de diámetro, coeficiente de flujo C_v de 0,23, trabaja con fluidos con una temperatura entre $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ y soporta presiones entre 0 y 7 bar [32].

Figura B27. Válvula solenoide de nitrógeno



Fuente: Autor

B.5 VARIADOR DE VELOCIDAD DEL MOTOR DE AGITACIÓN

Módulo SINAMICS G110, marca *Siemens*, referencia 6SL3211-13UA0, potencia nominal 0,37 kW (0,5 hp), alimentación de 230 VAC, corriente de entrada 6,2 A, corriente de salida 2,3 A.

El convertidor SINAMICS G110 sale de fábrica ajustado para poder funcionar sin necesidad de parametrizaciones adicionales; entre los parámetros por defecto del convertidor se tiene un factor de sobrecarga del motor de 150%, autoventilación del motor, frecuencia de 0 a 60 Hz y tiempos de aceleración y deceleración de 10 segundos [22].

Figura B28. Convertidor SINAMICS G110



Fuente: Autor

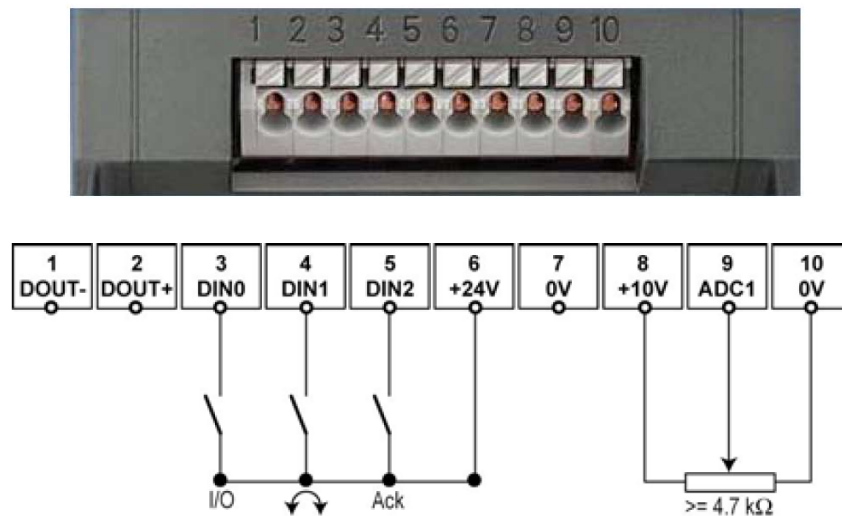
Advertencia

- Este equipo contiene tensiones peligrosas y controla partes mecánicas en rotación potencialmente peligrosas.
- En el circuito intermedio del módulo permanece un nivel de tensión peligroso durante 5 minutos tras que hayan sido desconectadas todas las tensiones. Por ello, una vez desconectado el convertidor de la fuente de alimentación, espere 5 minutos antes de efectuar trabajos en el módulo SINAMICS G110. El equipo se descarga en ese tiempo.
- Las entradas de red, los bornes de corriente continua y del motor pueden estar sometidas a tensión peligrosa aunque no esté funcionando el convertidor; antes de realizar cualquier trabajo de instalación, esperar 5 minutos para que la unidad pueda descargarse después de haberse desconectada de la fuente de alimentación.
- Los parámetros del motor se deben configurar con precisión para que la protección de sobrecarga del motor funcione correctamente para frecuencias mayores de 5 Hz.

Bornes

La figura B30 y la tabla B6 presentan los bornes disponibles en el convertidor, su significado y aquellos que han sido configurados como fuente de órdenes y fuente de consigna para la presente aplicación.

Figura B29. Bornes del convertidor



Fuente: Sinamics G110, Instrucciones de servicio resumidas, 2004, Siemens.

Tabla B6. Bornes del convertidor

Bornes	Significado	Función	Configuración
1	DOUT-	Salida Digital (-)	Sin conectar
2	DOUT+	Salida Digital (+)	Sin conectar
3	DIN0	Entrada Digital 0	Encender/Apagar
4	DIN1	Entrada Digital 1	Invertir giro
5	DIN2	Entrada Digital 2	Sin conectar
6	-	Salida +24 V / máx. 50 mA	Fuente de órdenes
7	-	Salida 0 V	Sin conectar
8	-	Salida +10 V	Velocidad de rotación
9	ADC1	Entrada Analógica	
10	-	Salida 0 V	

Fuente: Autor

El convertidor controla las acciones del moto-reductor marca *SEW* de 0.55 kW (0.75 hp).

La fuente de órdenes del convertidor recibe dos señales digitales provenientes de la tarjeta DAQ que modifican la activación del motor de agitación y el sentido de rotación, la manipulación de cada una señales digitales se realiza con la interfaz gráfica programada.

La entrada analógica (fuente de consigna) del convertidor está conectada a un potenciómetro en la tarjeta de interfaz de salidas digitales del tablero de control (ver figura 5), el ajuste del potenciómetro modifica la frecuencia del convertidor en el rango de 0 a 60Hz, cada frecuencia proporciona una determinada velocidad de rotación del motor de agitación en el rango de 0 a 92 rpm. La tabla B7 indica algunas frecuencias que presenta el convertidor y la correspondiente velocidad de rotación del motor.

Tabla B7. Frecuencia y velocidad de rotación

Frecuencia (Hz)	Velocidad (rpm)
5	7
10	14
20	29
30	46
40	61
50	77
55	84
60	92

Fuente: Autor

La tabla B7 también se encuentra presente en la interfaz gráfica programada en la pestaña MOTOR DE AGITACIÓN (ver anexo D.1.6).

ANEXO C. PROTOCOLOS DE PREPARACIÓN Y DESCARGA DEL FERMENTADOR

C.1 PREPARACIÓN DEL FERMENTADOR

1. Desconectar los sensores de los controladores.
2. Descargar el ácido y la base que se encuentren en las mangueras que salen de las bombas.
3. Poner los extremos de las mangueras en el lavamanos.
4. Levantar la tapa y el eje de agitación con el equipo-grúa.
5. Limpiar el interior del tanque, el eje de agitación, los baffles y la canasta con desinfectante (hipoclorito de sodio al 0,05% v/v).
6. Quitar la protectora de del electrodo de pH.
7. Enjuagar el electrodo de pH con agua destilada.
8. Colocar los baffles y la canasta en el interior del tanque.
9. Bajar la tapa lentamente hasta una altura de 30 cm sobre el borde superior del fermentador.
10. Conectar en la cara inferior de la tapa la manguera del *sparger*, la manguera de toma de muestras, la manguera de los sensores y las mangueras de ácido y base.
11. Bajar la tapa completamente.
12. Cerrar el fermentador ajustando las tuercas que están en posiciones opuestas.
13. Conectar la manguera de N₂ a la entrada del *sparger*, la manguera de toma de muestras a la jeringa, las mangueras de ácido y base a las válvulas correspondientes.
14. Conectar los sensores a los controladores.
15. Llenar las botellas contenedoras de ácido y base a un volumen de 3 litros.
16. Revisar las conexiones de las bombas y ajustar si es necesario.
17. Abrir el cilindro contenedor de N₂ y ajustar la presión.

18. Cargar el fermentador con el medio de crecimiento e inóculo usando un embudo.
19. Encender el tablero de control.
20. Iniciar el programa de monitorización presionando el botón RUN.
21. Preparar las bombas: Girar 1/4 la perilla negra ubicada sobre la cabeza de la bomba, encender las bombas de ácido y base a través del programa de monitorización, esperar que las mangueras se presuricen y se llenen de solución, apagar las bombas a través del programa de monitorización, devolver el cuarto de giro de la perilla negra.
22. Purgar el medio de crecimiento: Abrir la válvula solenoide de N₂ a través del programa de monitorización, dejar el suministro de N₂ hasta que la concentración de oxígeno medido alcance un valor estable, cerrar la válvula solenoide de N₂ a través de programa.
23. Abrir la llave de paso de agua de enfriamiento.
24. Encender el motor de agitación a través del programa de monitorización, ajustar la velocidad con la perilla ubicada en el tablero de control.
25. Presionar el botón de guardar datos en el programa de monitorización.
26. Seleccionar del modo de control para cada una de las variables.
27. Inicio de la fermentación.

**ES OBLIGATORIO USAR BATA PARA LABORATORIO DE MANGA LARGA,
GUANTES Y PROTECCIÓN PARA EL ROSTRO**

C.2 DESCARGA DEL FERMENTADOR

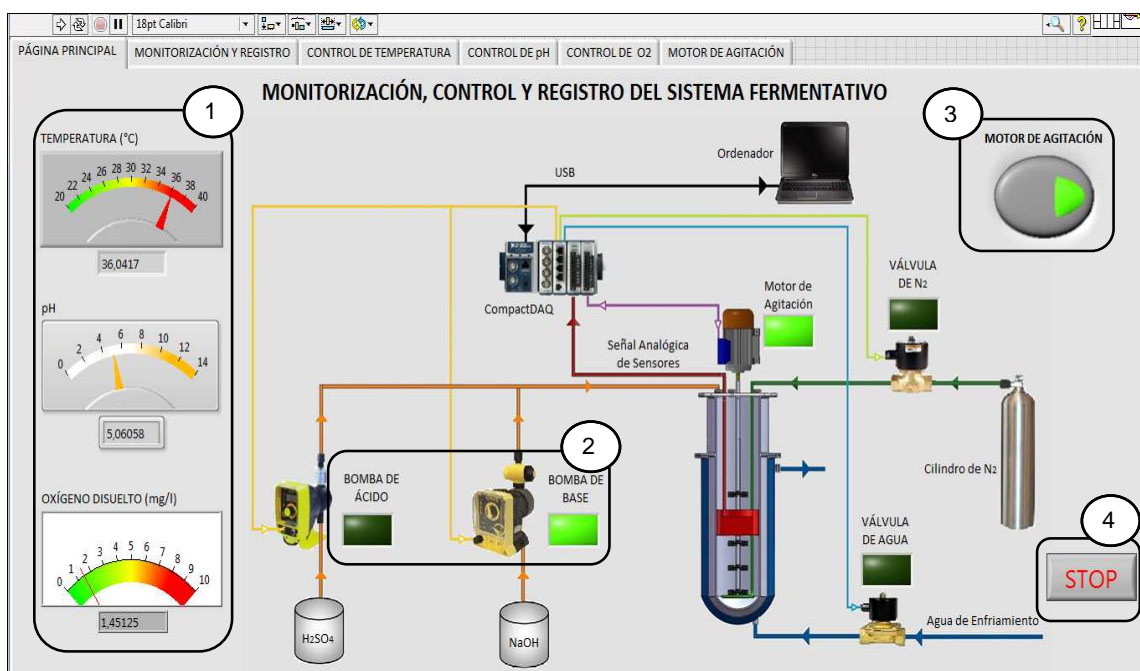
1. Detener el programa de monitorización presionando el botón STOP en la pestaña PAGINA PRINCIPAL.
2. Bajar los *breaker* de corriente en el tablero de control.
3. Cerrar la llave de paso de agua de enfriamiento.
4. Cerrar el cilindro contenedor de N₂ y liberar el flujo presente en la tubería abriendo una de las llaves de paso de salida.
5. Desconectar los sensores de los controladores.
6. Desconectar de la cara superior de la tapa: la manguera de N₂, la manguera de toma de muestras y las mangueras de ácido y base (PRECAUCIÓN ANTE EL GOTEO AL DESAJUSTAR).
7. Descargar el ácido y la base que se encuentren en las mangueras.
8. Poner las válvulas de las mangueras de ácido y base en el lavamanos.
9. Vaciar el tanque de fermentación abriendo la llave de paso ubicada en la parte inferior.
10. Desajustar las tuercas de la tapa del fermentador.
11. Usando el equipo-grúa levantar lentamente la tapa y desconectar de su cara inferior: la manguera del *sparger*, la manguera de toma de muestras, las mangueras de ácido y base y la manguera de los sensores.
12. Levantar completamente la tapa y el eje de agitación.
13. Sacar la canasta y los baffles del interior del tanque.
14. Enjuagar con agua destilada el electrodo de pH y colocar la tapa protectora.
15. Limpiar el interior del tanque, el eje de agitación, los baffles y la canasta.
16. Bajar la tapa completamente usando el equipo-grúa

**ES OBLIGATORIO USAR BATA PARA LABORATORIO DE MANGA LARGA,
GUANTES Y PROTECCIÓN PARA EL ROSTRO**

ANEXO D. PANEL FRONTAL DEL PROGRAMA DE MONITORIZACIÓN Y DIAGRAMA DE BLOQUES

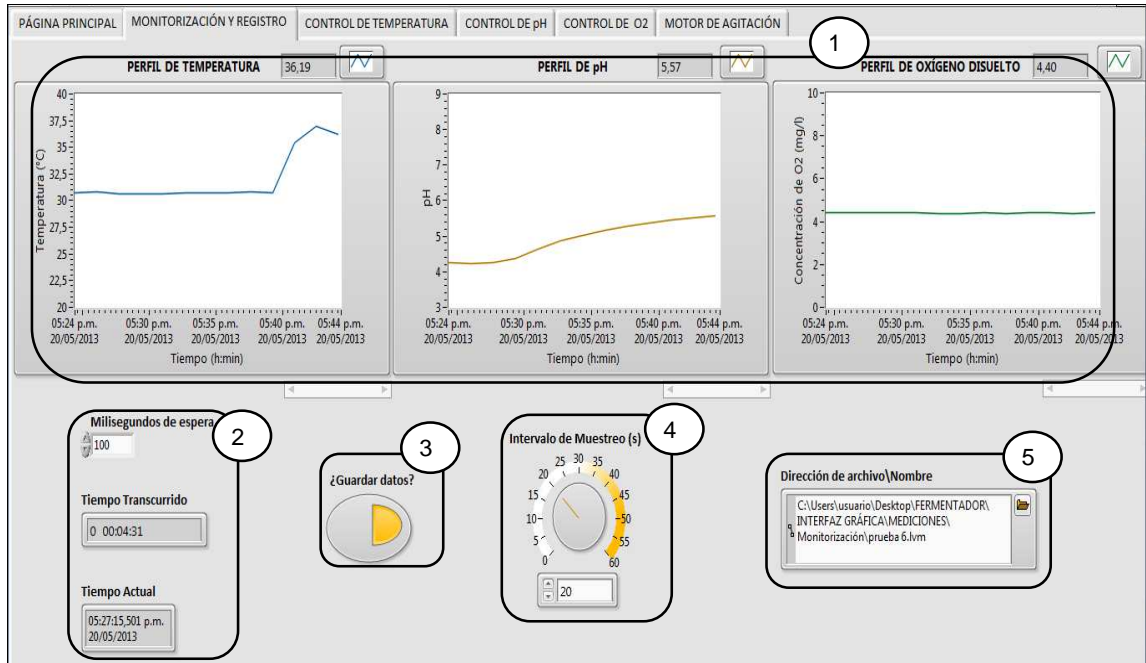
D.1 PANEL FRONTAL

D.1.1 Pestaña PÁGINA PRINCIPAL



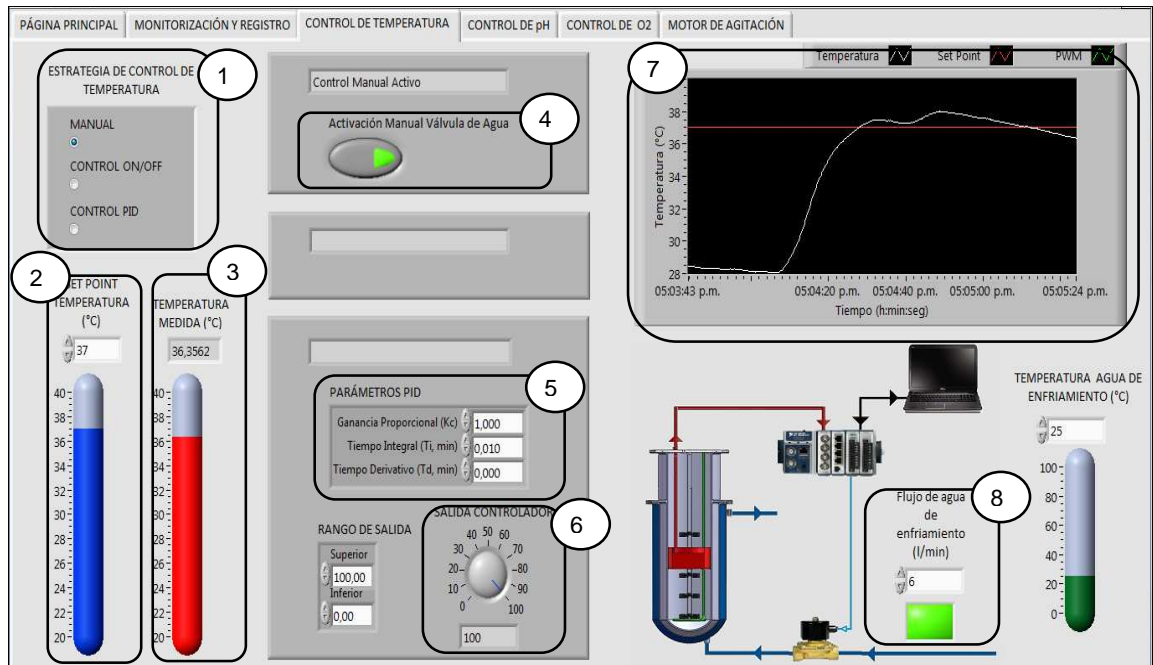
1. Indicadores numéricos de las mediciones *on-line* de temperatura, pH y oxígeno disuelto.
2. *LEDs* que indican el encendido o apagado de los elementos finales de control.
3. Botón para encender o apagar el motor de agitación.
4. Botón para detener la adquisición de datos y apagar todos los actuadores.

D.1.2 Pestaña MONITORIZACIÓN Y REGISTRO



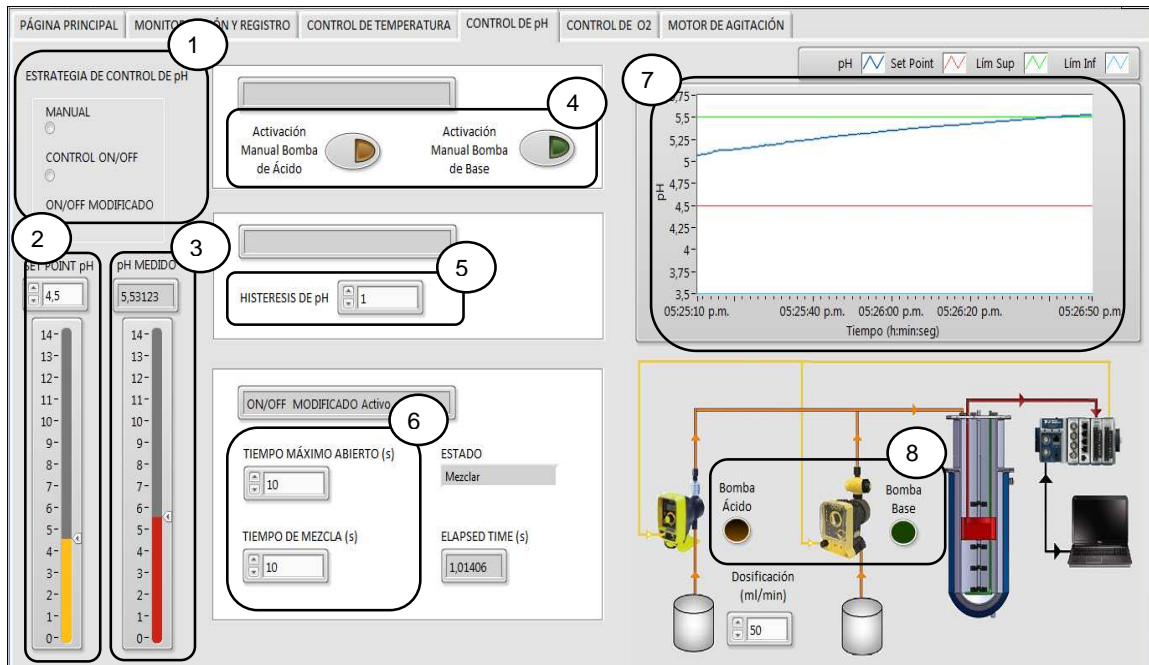
1. Gráficas que presentan los perfiles de temperatura, pH y oxígeno disuelto en todo el intervalo de la fermentación.
2. Indicadores numéricos del tiempo de espera de cada ciclo interno del programa, tiempo transcurrido desde el inicio del programa y hora actual.
3. Botón con el cuál se inicia el registro de los datos de las mediciones *on-line* en el archivo de formato *.lvm*
4. Perilla para seleccionar el intervalo de muestreo o espaciamiento de tiempo entre los datos guardados.
5. Control para ingresar la ubicación y el nombre del archivo a guardar.

D.1.3 Pestaña CONTROL DE TEMPERATURA



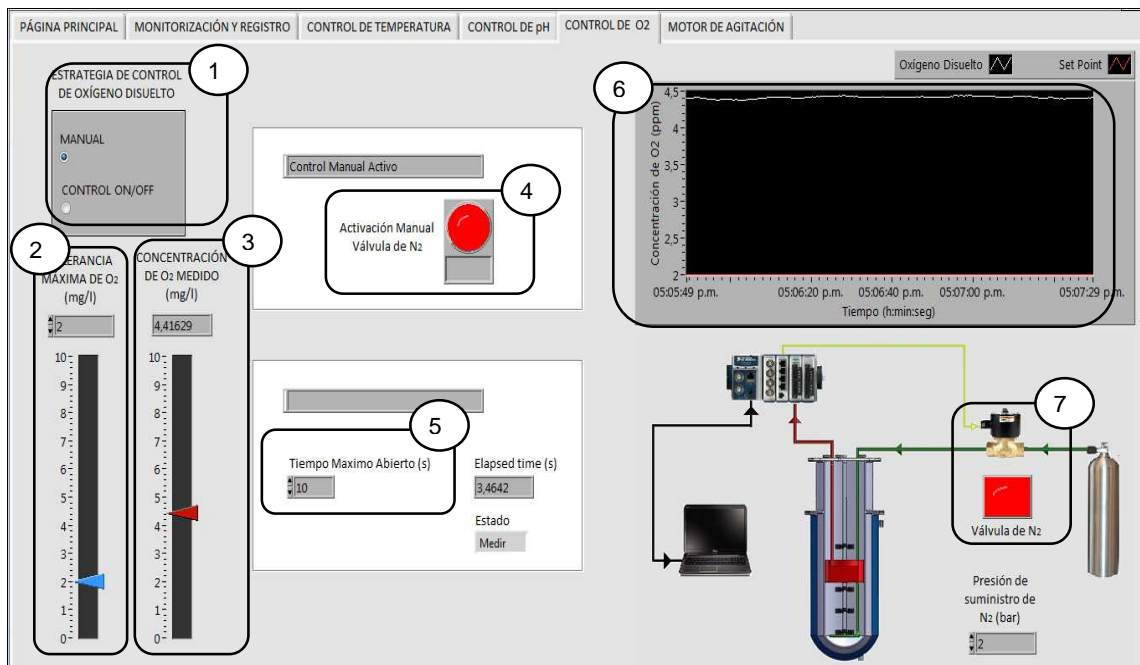
1. *Radio Button* que permite seleccionar el modo de control de la temperatura.
2. Control numérico para ingresar el *set point* de temperatura.
3. Indicador numérico de la temperatura en tiempo real.
4. Botón para abrir o cerrar la válvula cuando fue seleccionada la estrategia de control MANUAL.
5. Control numérico para ingresar el valor de los parámetros del controlador PID.
6. Indicador de la salida del controlador en un rango de cero a cien.
7. Gráfica de las mediciones *on-line* de la temperatura.
8. *LED* que indican el encendido o apagado de la válvula solenoide que maneja el flujo de agua de enfriamiento.

D.1.4 Pestaña CONTROL DE pH



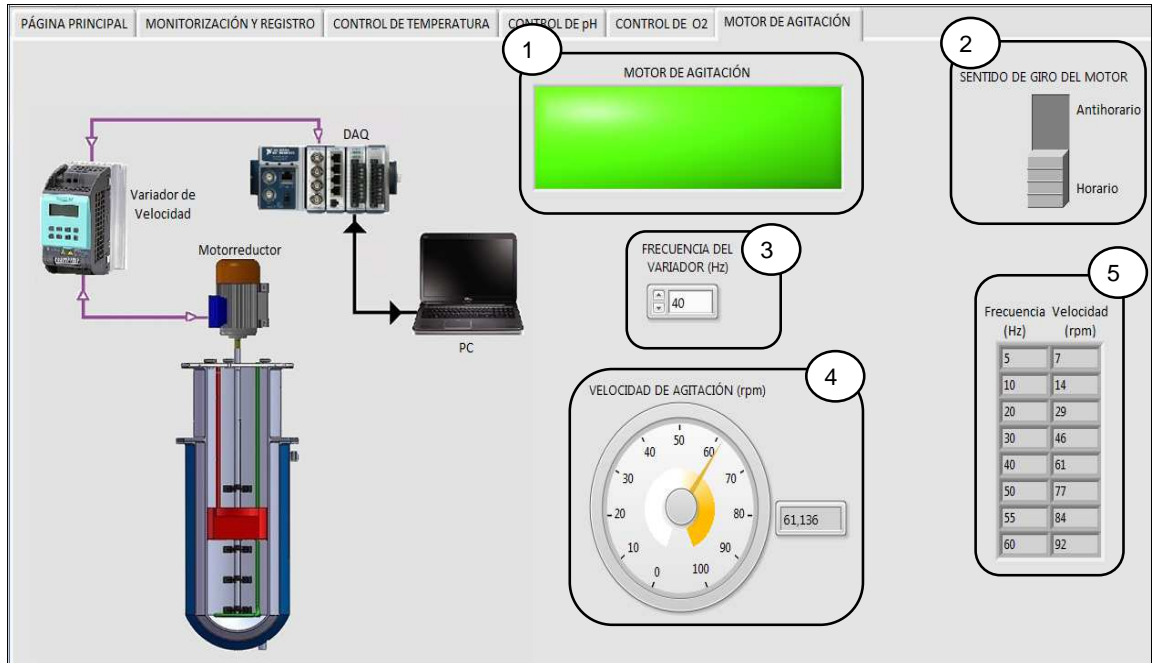
1. *Radio Button* para seleccionar la estrategia de control de pH.
2. Control numérico para ingresar el *set point* de pH.
3. Indicador numérico del pH en tiempo real.
4. Botón para encender o apagar las bombas que suministran ácido y base cuando es seleccionado la estrategia de control MANUAL.
5. Control numérico para ingresar la histéresis de pH o rango de tolerancia de la variable; aplicable en los modos de control ON/OFF y ON/OFF MODIFICADO.
6. Control numérico para el tiempo máximo en que pueden estar encendidas las bombas y el tiempo de espera después de realizar la dosificación; aplicables en el modo de control ON/OFF MODIFICADO.
7. Gráfica de las mediciones *on-line* de pH.
8. *LEDs* que indican el encendido o apagado de cada una de las bombas que suministran ácido y base.

D.1.5 Pestaña CONTROL DE O₂



1. *Radio Button* para seleccionar la estrategia de control de oxígeno disuelto.
2. Control numérico para ingresar la tolerancia máxima de oxígeno en el tanque de fermentación.
3. Indicador numérico de la concentración de oxígeno en tiempo real.
4. Botón para abrir o cerrar la válvula que suministra nitrógeno puro cuando ha sido seleccionada la estrategia de control MANUAL.
5. Control numérico para ingresar el tiempo máximo en que puede durar abierta la válvula de N₂; aplicable en la estrategia de control ON/OFF.
6. Gráfica de las mediciones *on-line* de concentración de oxígeno disuelto.
7. *LED* que indican el momento en que está abierta o cerrada la válvula de nitrógeno.

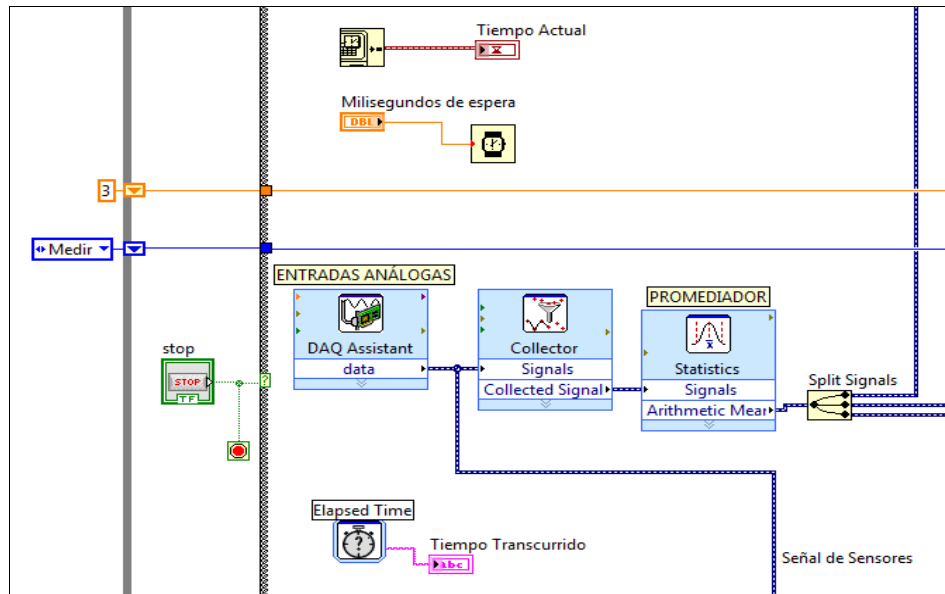
D.1.6 Pestaña MOTOR DE AGITACIÓN



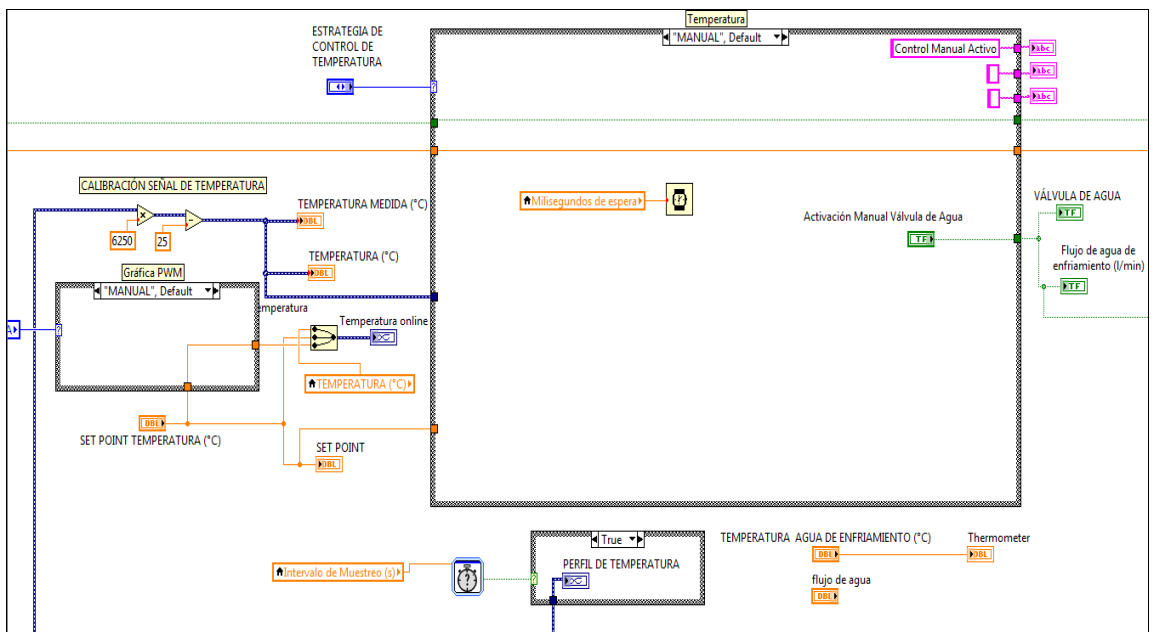
1. *LED* que indican el momento en que esta encendido el motor de agitación.
2. Botón para cambiar el sentido de giro del motor de agitación.
3. Control numérico para ingresar el valor de frecuencia que muestra el variador de velocidad.
4. Indicador numérico que realiza la conversión de frecuencia en revoluciones por minutos (rpm).
5. Tabla de equivalencias entre la frecuencia del convertidor y la velocidad de rotación del motor.

D.2 DIAGRAMA DE BLOQUES

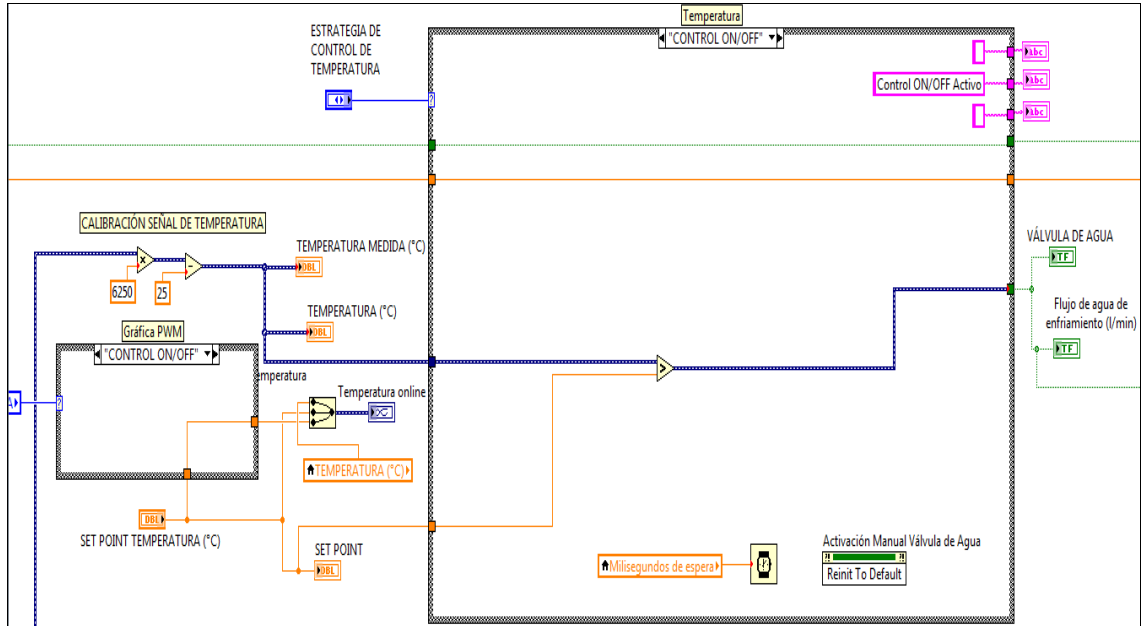
D.2.1 Adquisición de datos



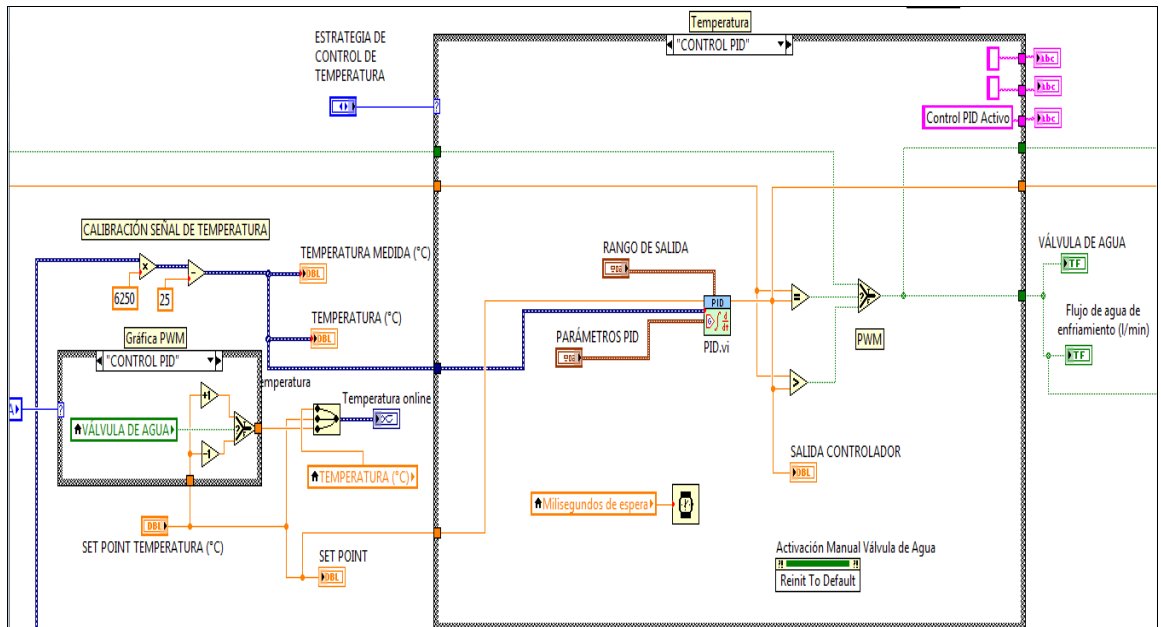
D.2.2 Case para control MANUAL de Temperatura



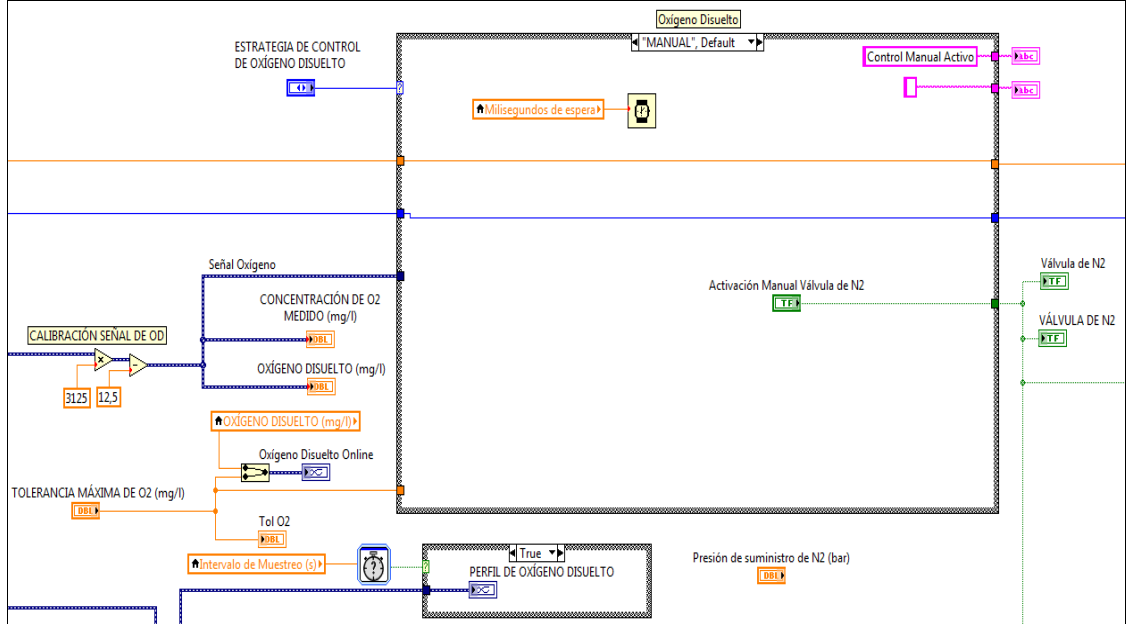
D.2.3 Case para CONTROL ON/OFF de Temperatura



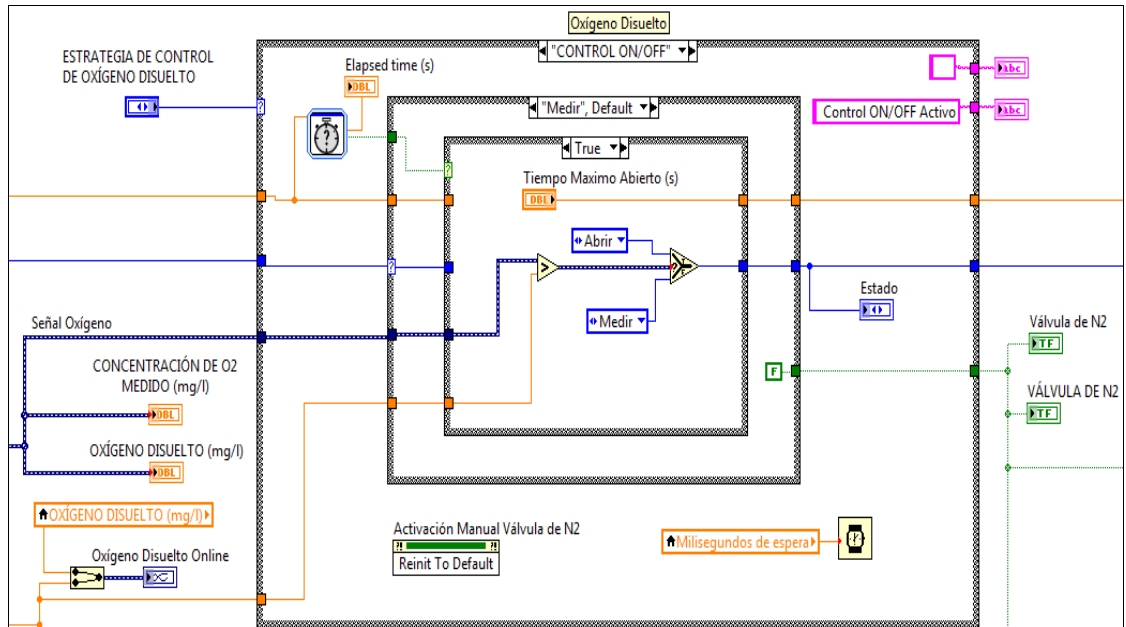
D.2.4 Case para CONTROL PID de Temperatura



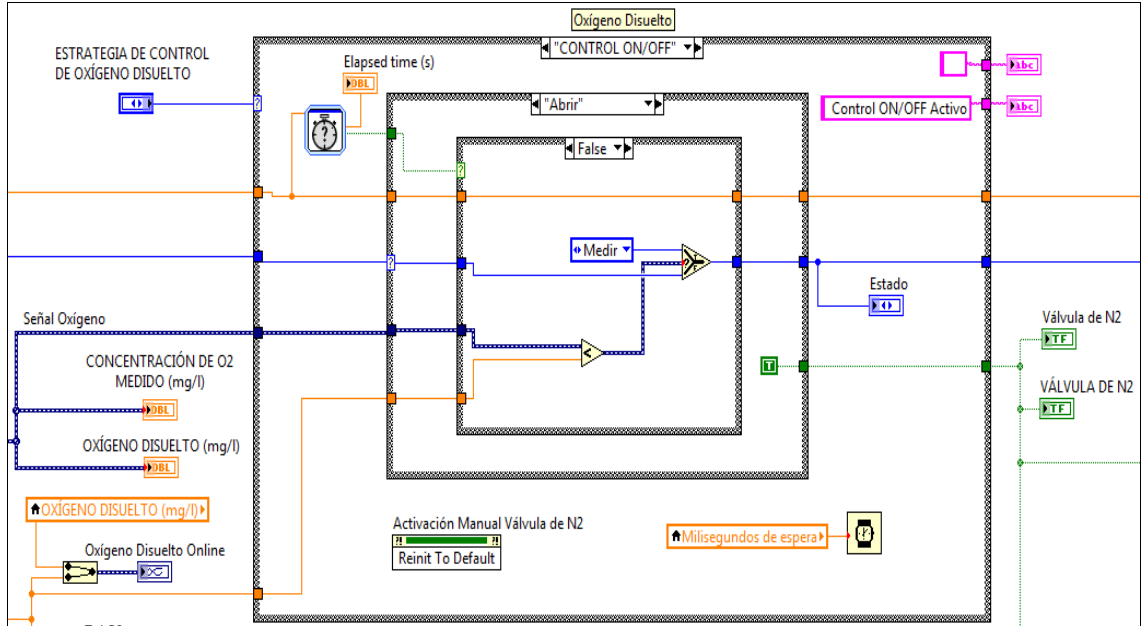
D.2.5 Case para control MANUAL de oxígeno disuelto



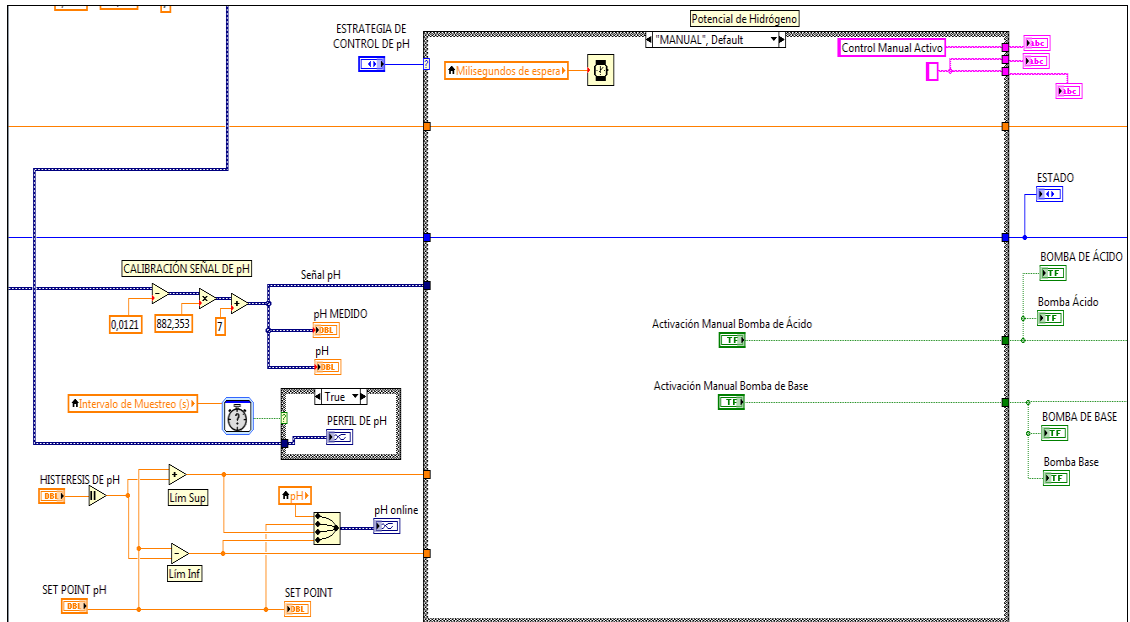
D.2.6 Case para CONTROL ON/OFF de oxígeno disuelto, estado *Medir*



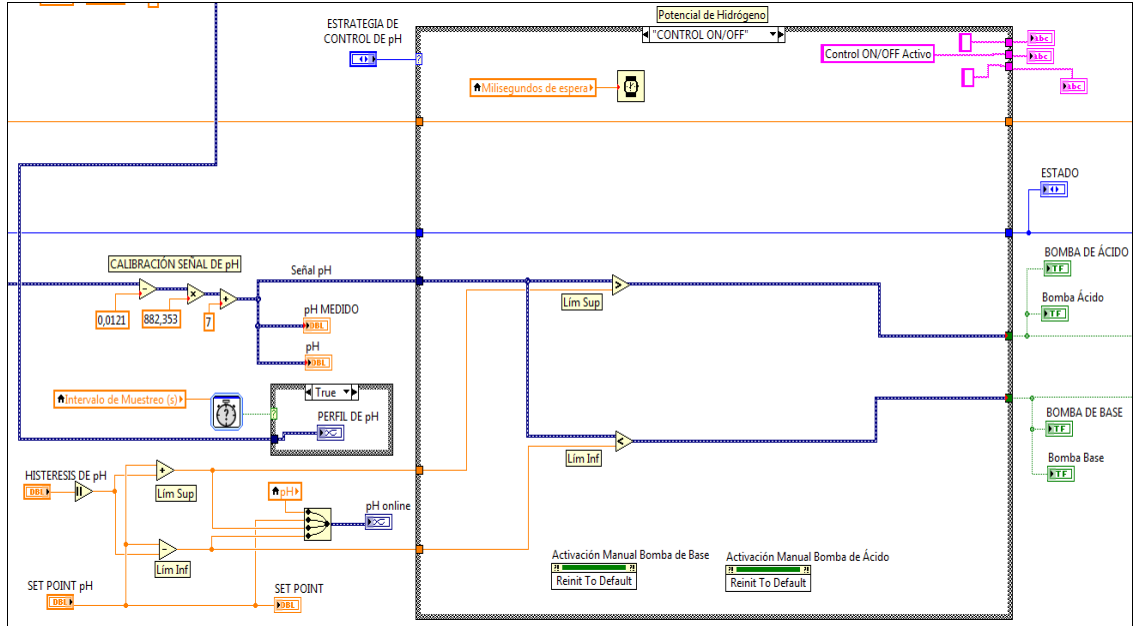
D.2.7 Case para CONTROL ON/OFF de oxígeno disuelto, estado *Abrir*



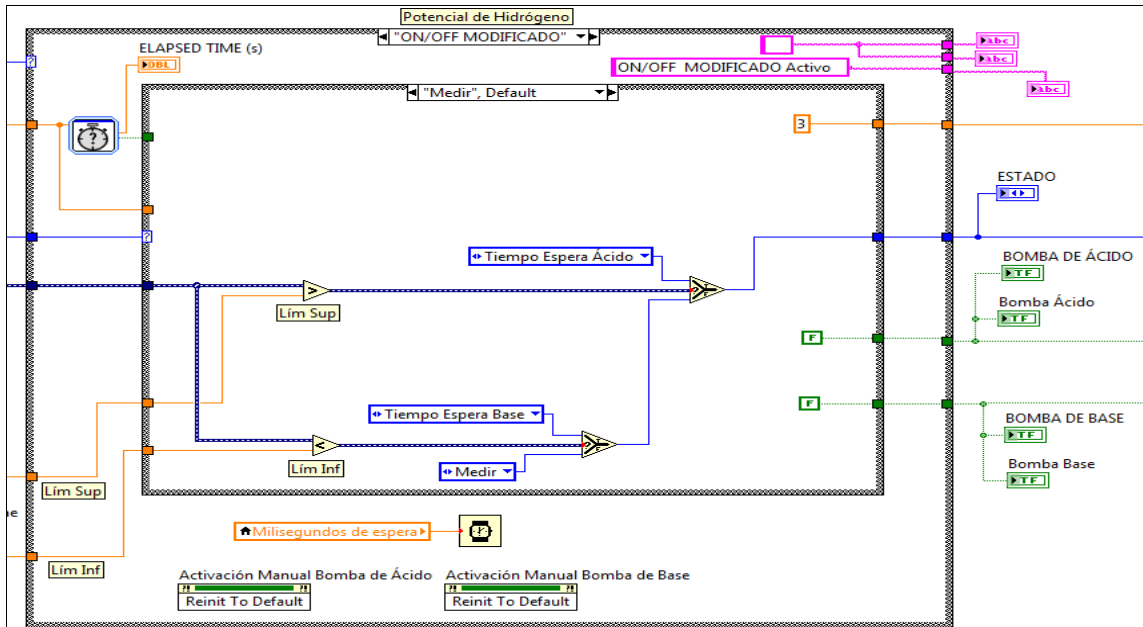
D.2.8 Case para control MANUAL de pH



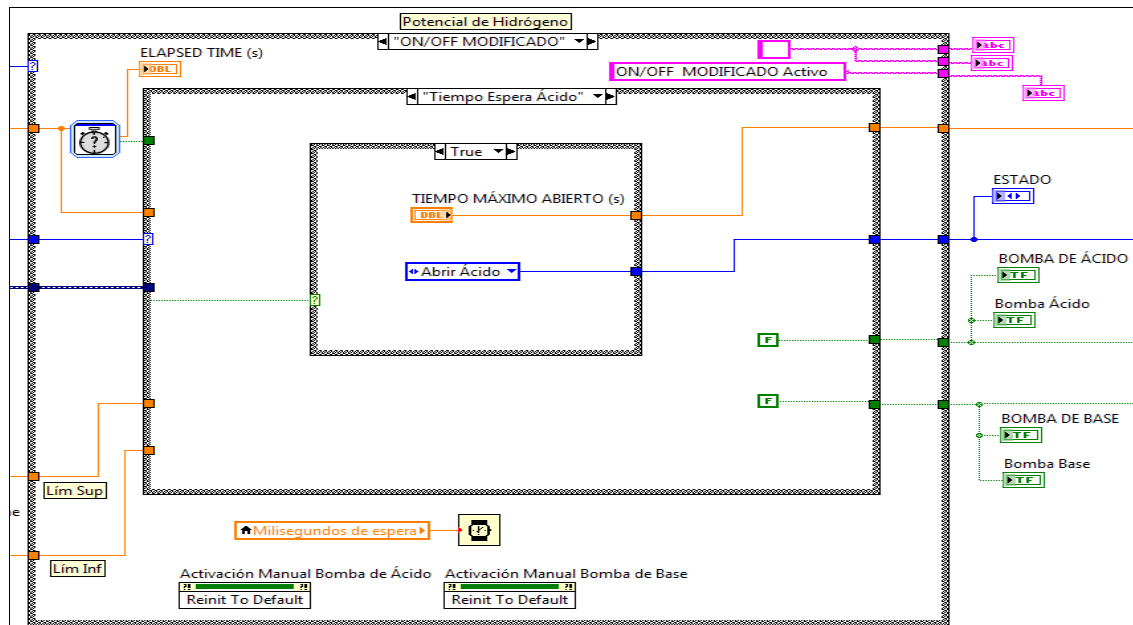
D.2.9 Case para CONTROL ON/OFF de pH



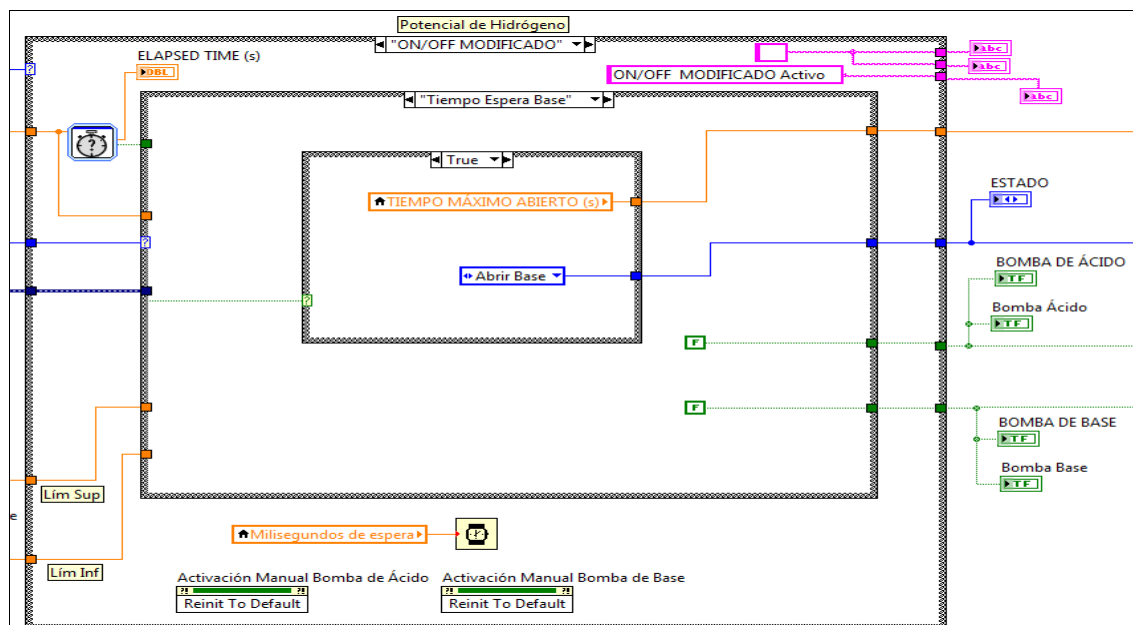
D.2.10 Control ON/OFF MODIFICADO de pH, estado *Medir*



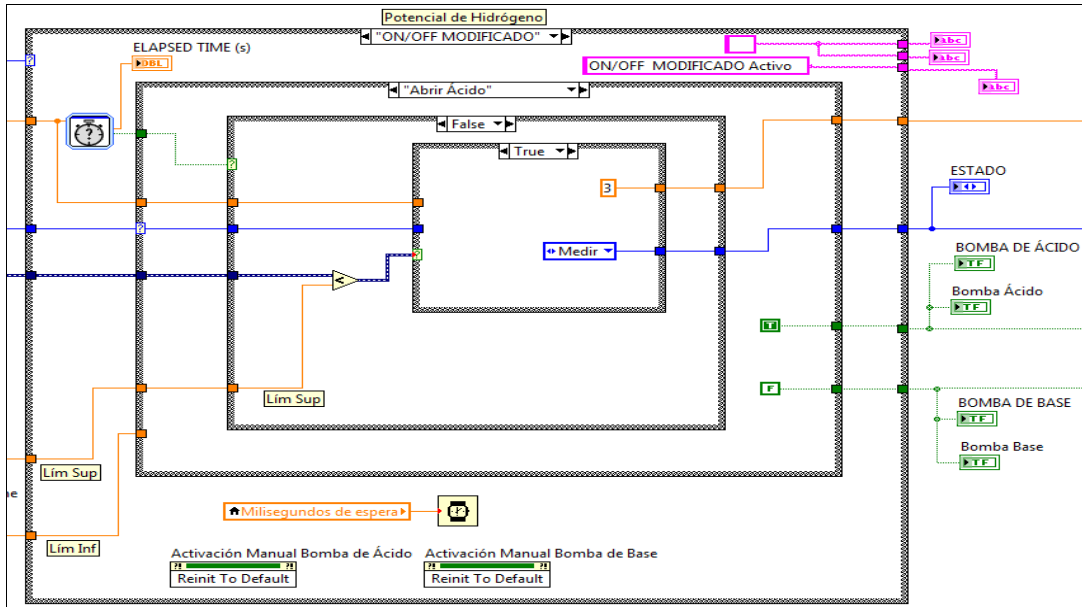
D.2.11 Control ON/OFF MODIFICADO de pH, estado *Tiempo Espera Ácido*



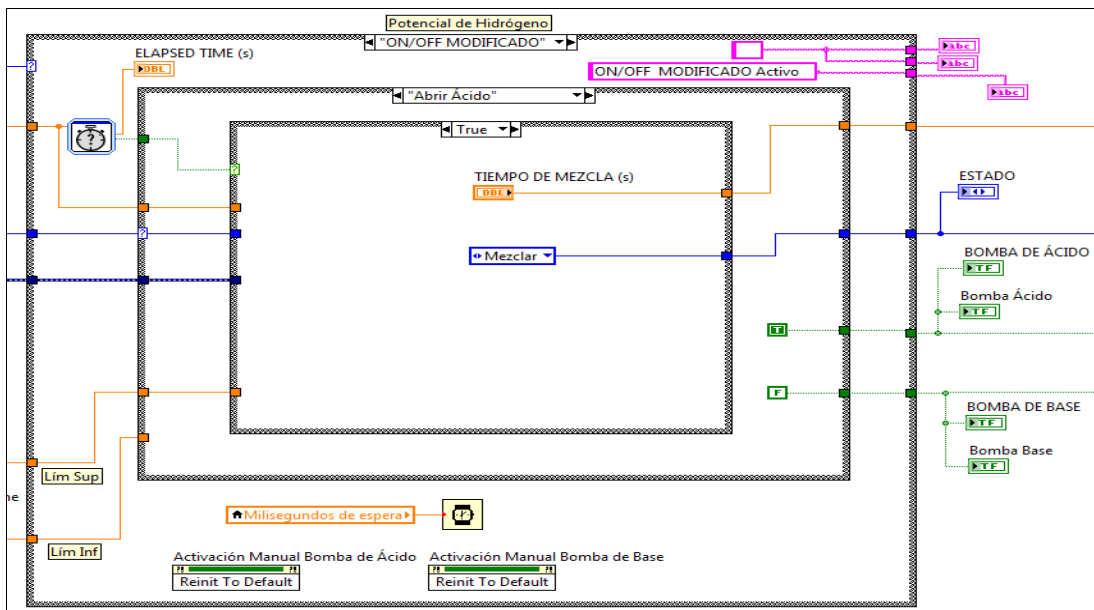
D.2.12 Control ON/OFF MODIFICADO de pH, estado *Tiempo Espera Base*



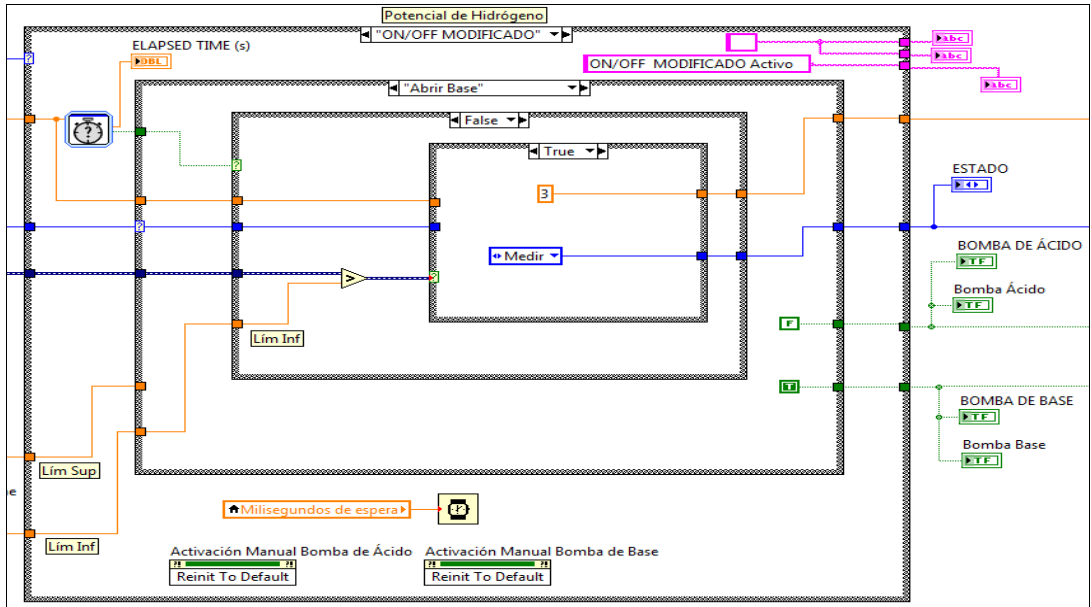
D.2.13 Control ON/OFF MODIFICADO de pH, estado *Abrir Ácido*, sub-opción *False*



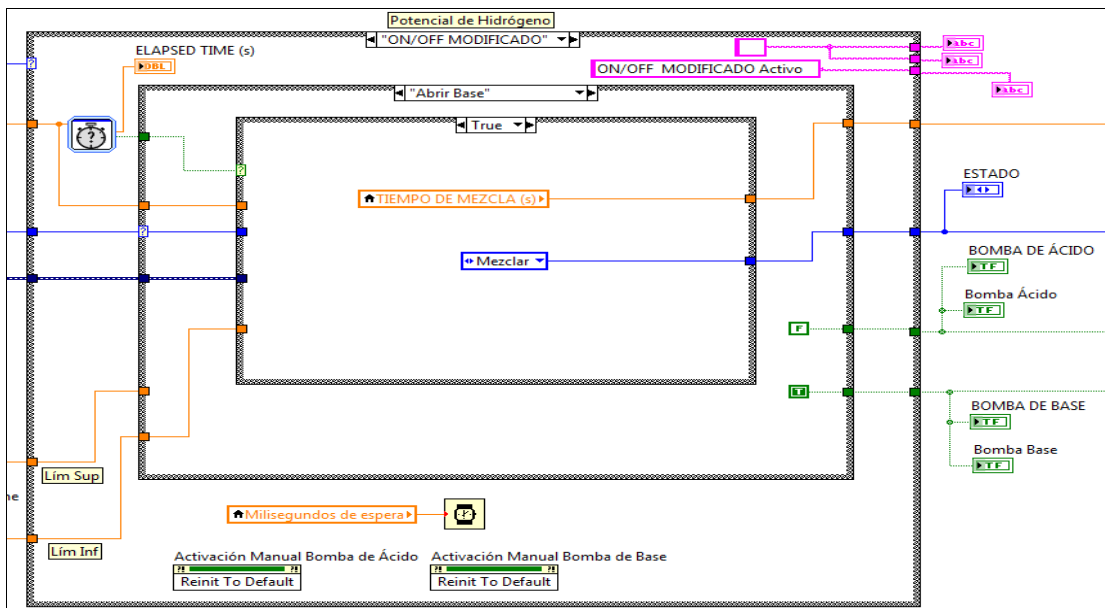
D.2.14 Control ON/OFF MODIFICADO de pH, estado *Abrir Ácido*, sub-opción *True*



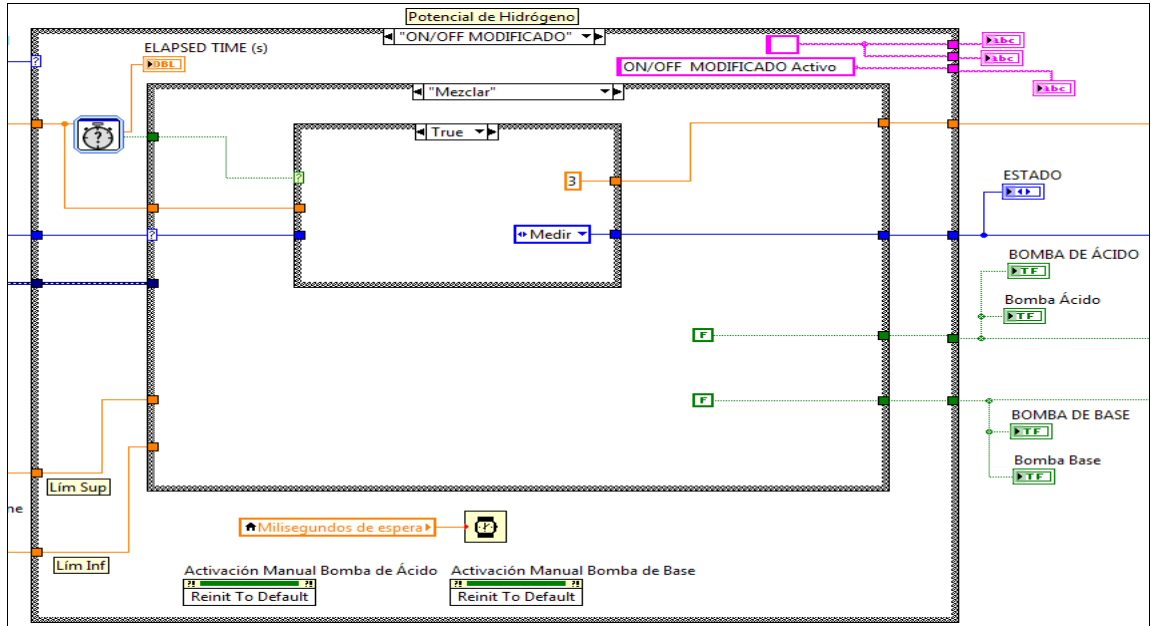
D.2.15 Control ON/OFF MODIFICADO de pH, estado *Abrir Base*, sub-opción *False*



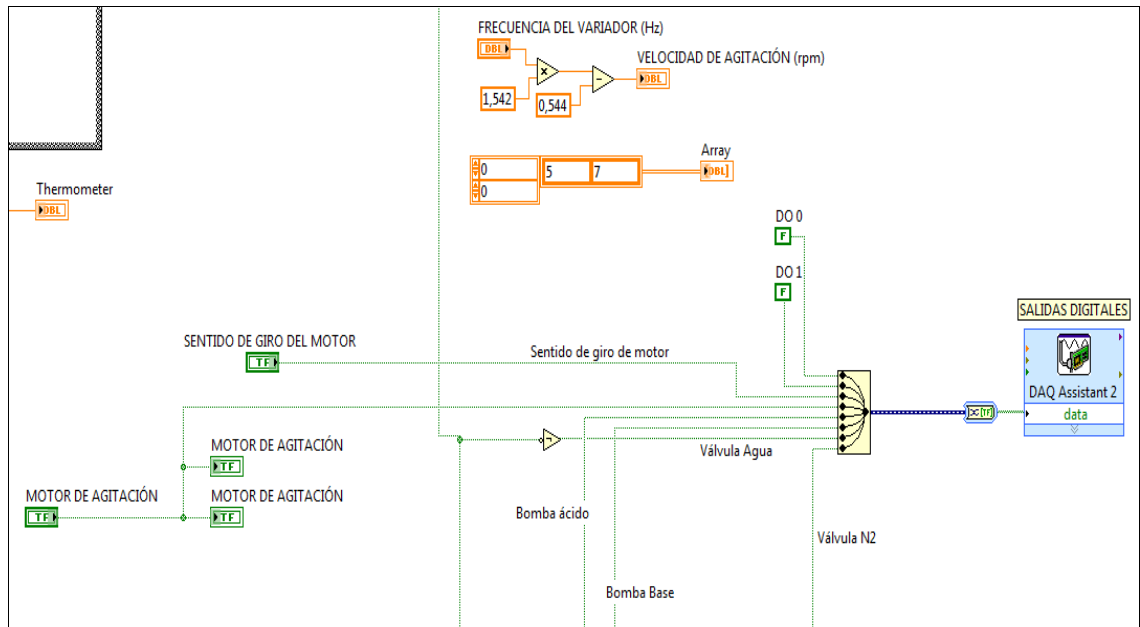
D.2.16 Control ON/OFF MODIFICADO de pH, estado *Abrir Base*, sub-opción *True*



D.2.17 Control ON/OFF MODIFICADO de pH, estado Mezclar



D.2.18 Salidas digitales y controles del motor de agitación



D.2.19 Subrutina para guardar los datos medidos

