



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**SISTEMA AUTOMÁTICO PARA REALIZAR
PRUEBAS DE BIODEGRADABILIDAD
ANAEROBIA**

T E S I S

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO
P R E S E N T A N :
MENDOZA HERNÁNDEZ ISMAEL
MORENO HERNÁNDEZ JOSÉ CARLOS**

DIRECTOR DE TESIS: DR. ALEJANDRO VARGAS CASILLAS



MÉXICO, D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA, 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado:

Presidente: Dr. Pablo Roberto Pérez Alcázar

Vocal: Dr. Alejandro Vargas Casillas

Secretario: Dr. Gerardo Espinosa Pérez

1^{ER} Suplente: Ing. José Salvador Zamora Alarcón

2^{DO} Suplente: Ing. Rafael Flores García

Agradecimientos

❖ Al **LIPATA (Laboratorio de Investigación de Procesos Avanzados para Tratamiento de Aguas)** del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

❖ Al proyecto PAPIIT-DGAPA 108107.

❖ Al Dr. Alejandro Vargas Casillas.

❖ A :

Fabián Fernández,

M. en I. Alfredo Montes,

M. en I. Silvana Salazar,

M. en I. Carolina Carvajal,

José Carlos Moreno Hernández agradece a:

❖ Mi Familia por todo el apoyo y la paciencia.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción	1
1.2 Pruebas de biodegradabilidad	3
1.2.1 Tipos y técnicas	4
1.3 Factores de una prueba de biodegradabilidad	5
1.4 Etapas de una prueba de biodegradabilidad	8

CAPÍTULO 2

2.1 Pruebas de biodegradabilidad anaerobia.	10
2.2 Prueba automatizada de biodegradabilidad anaerobia del Instituto de Ingeniería UNAM.	11
2.2.1 Fundamento de la automatización	12
2.2.2 Primera versión	13
2.2.2.1 Funcionamiento	14
2.2.3 Segunda versión	15
2.2.3.1 Ventajas	15
2.2.3.2 Desventajas	17
2.3 Áreas de mejora	20
2.3.1 Funcionamiento del equipo	21
2.3.2 Uso del equipo	22
2.4 Aportes	23

CAPÍTULO 3

3.1 Conceptos básicos de medición	24
3.2 Sistemas de adquisición de datos	25
3.2.1 Transductores	26
3.2.1.1 Transductores de Presión	26
3.2.1.2 Transductor de temperatura LM35	28
3.2.2 Adecuación de señal	29
3.2.3 Adquisición de señales	30
3.3 Reingeniería del equipo	32
3.4 Elección y diseño de componentes (razones y fundamentos)	35
3.4.1 Transductor de presión	35
3.4.2 Transductor de temperatura	36
3.4.3 Válvulas solenoides	36
3.4.4 Tarjeta de fuente de poder y de adecuación de señal	37
3.4.5 Interconexiones para flujo de biogás	39
3.4.6 Tarjeta de adquisición de datos	39
3.4.7 Software LabVIEW 7.1	40

CAPÍTULO 4

4.1 Estructura general del equipo y disposición de componentes	41
4.2 Hardware	42
4.2.1 Reactores	42
4.2.2 Gabinete	43
4.3 Software	52
4.3.1 Introducción	52
4.3.2 Programación en LabVIEW	53
4.3.2.1 Bloques del programa de aplicación	53
4.3.2.2 Diagrama de flujo SABiA	57
4.3.2.3 Código de programa	61
4.3.2.4 Ventanas de programa	68

CAPÍTULO 5	
5.1 Resultados	73
5.1.1 Funcionamiento	73
5.1.1.1 Calibración del equipo	73
5.1.1.2 Prueba de Fugas	75
5.1.1.3 Prueba de algoritmos de Software	76
5.2. Experimentos realizados	77
5.3 Características generales del equipo SABiA	78
5.3.1 Generalidades	78
5.3.2 Límites de detección	78
5.3.3 Costos	79
5.4 Objetivos cumplidos	81
5.5 Comparación con la versión anterior	83
5.5.1 Tamaño	83
5.5.2 Costo	84
5.6 Recomendaciones	84
5.6.1 Cambiar las botellas	85
5.6.2 Ampliación del sistema	85
5.6.3 Mantenimiento	85
5.6.3.1 Calibración	86
5.6.3.2 Reemplazo de componentes	86
5.7 Conclusiones	87
APÉNDICE A	88
A.1 Inicio de programa	89
A.2 Ciclado de programa	93
A.3 Fin de programa	98
A.4 Configuración de tarjeta	99
APÉNDICE B	101
BIBLIOGRAFÍA	106

Capítulo 1

1.1 Introducción

El desarrollo industrial ha propiciado que se generen desechos de materiales y/o sustancias ajenas al medio ambiente causando con ello un desequilibrio cuando se trata de reintegrarlas, puesto que el proceso de degradación resulta ajeno a los mecanismos convencionales de éste. Los desechos de compuestos y/o sustancias disueltos en medio acuoso generalmente son eliminados mediante aguas residuales, ya sea de tipo doméstico o industrial. Existe una demanda creciente de la sociedad por realizar un tratamiento previo de aguas residuales de diversos orígenes, para que de manera eficiente sean reintegradas al medio evitando su acumulación. Con ello se tratan de minimizar los efectos que puedan producirse al entrar en contacto este tipo de desechos con el medio. Esto ha propiciado el desarrollo de estudios en la materia, los cuales son de vital importancia para la preservación del medio.

Los métodos desarrollados para realizar un tratamiento previo al agua residual buscan descomponer o degradar compuestos complejos en compuestos más sencillos, favoreciendo con ello la eficacia de la reintegración y minimizando los efectos al momento de ponerlos en contacto con el medio ambiente. Estos métodos dependen principalmente del tipo de materia contenida en el agua residual. Si la materia contenida en el agua residual es de tipo inorgánica, se utilizan métodos fisicoquímicos. En cambio, para la materia orgánica se utilizan por lo general procesos biológicos. (Moreno y Buitrón, 1997)

El tratamiento de las aguas residuales mediante procesos biológicos está basado en la biodegradación. La biodegradación se define como el proceso de degradación

microbiana de sustancias orgánicas complejas en sustancias más sencillas. Cuando el proceso de biodegradación transforma la sustancia, esto es que desaparece la sustancia original, llegando sólo a estadios parciales del proceso, se le denomina biodegradación primaria. Se le denomina biodegradación completa o última cuando, aparte de existir una transformación de la sustancia, se obtiene de ello CO_2 , CH_4 y constituyentes del material celular (biomasa). (Rozzi y Remigi, 2004)

Sumado a ello, el proceso de biodegradación puede llevarse a cabo en presencia de oxígeno o en ausencia de él. La biodegradación aerobia es una degradación microbiana llevada a cabo en presencia de oxígeno; sus principales productos son: bióxido de carbono (CO_2), agua (debido a la reducción de oxígeno molecular) y biomasa microbiana. La biodegradación anaerobia, por el contrario, es una degradación microbiana llevada a cabo en concentraciones muy bajas o inexistentes de oxígeno. En este caso, los microorganismos emplean compuestos orgánicos e inorgánicos como aceptores de electrones (materia orgánica, nitratos, nitritos y sulfatos, entre otros, como fuentes de energía); sus principales productos son el metano (CH_4), bióxido de carbono (CO_2) y trazas de ácido sulfhídrico (H_2S). (Cardinale, 1996)

A la capacidad de una sustancia de ser transformada en compuestos más sencillos por acción de microorganismos se le llama biodegradabilidad. La relevancia de los estudios que conciernen al proceso de biodegradación, y por ende al potencial de biodegradabilidad de una sustancia, radican en que los microorganismos degradadores desarrollaron hace millones de años mecanismos bioquímicos para la degradación de sustancias naturales; tales que en un largo plazo no causan daño al ambiente.

Los procesos naturales de degradación se han desarrollado desde hace ya varios siglos. Su metodización y eficiencia se han mejorado, desde principios del siglo pasado, mediante unidades de ingeniería que copian o simulan las condiciones naturales de este tipo de degradación. Las plantas de tratamiento biológicas de agua residual son las

más eficientes para la degradación de agua residual, puesto que maximizan la utilización de energía y de recursos y en ellas se optimizan los mecanismos de biodegradación que se dan en el ambiente de forma natural.

Haciendo referencia a lo antes expuesto, puede inferirse que el aprovechamiento de procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales es de vital importancia, no sólo como una forma alternativa para dicho tratamiento, sino más bien como la forma primaria de tratamiento, siendo ésta eficiente, segura y disminuyente de riesgos para el ambiente.

1.2 Pruebas de biodegradabilidad

La susceptibilidad de una sustancia para ser biodegradada requiere de estudios de tipo exploratorio, o sea de pruebas de biodegradabilidad. Hay que mencionar que el conjunto de compuestos que pueden ser tratados mediante microorganismos degradadores (hongos, bacterias, protozoarios, principalmente) en un proceso de biodegradación no sólo concierne a los de origen orgánico como la biomasa disponible de animales y plantas, así como sus productos de excreción, sino que muchas sustancias derivadas de la actividad humana y en concreto, de la actividad industrial, tienen estructuras similares a los compuestos orgánicos. Esto hace viable la degradación por métodos biológicos. (Moreno y Buitrón, 1997)

Las pruebas de biodegradabilidad tienen sus inicios a principios de la segunda mitad del siglo pasado como una respuesta a la preocupación del uso extensivo de detergentes sintéticos a nivel mundial, los cuales eran difíciles de biodegradar, produciendo problemas de espuma en aguas superficiales. Primeramente, los métodos establecidos para realizar las pruebas de biodegradabilidad se enfocaban al estudio de

la biodegradabilidad primaria. Los resultados de este tipo de pruebas, donde sólo se evaluaba la biodegradación primaria, conllevaban un desconocimiento acerca del destino final de la sustancia. Es por ello que dos décadas después el enfoque se cambió de estudiar la biodegradabilidad primaria, a estudiar la última; puesto que los resultados que se obtienen son de mayor relevancia para el análisis de riesgo ambiental. (Cardinale, 1996)

La amplia variedad de efluentes que resultan, ya sea de manera directa o indirecta, de la actividad industrial, así como la diferenciación de los ecosistemas, requieren de estudios representativos de las condiciones en las que se lleva a cabo el proceso de biodegradación. Es por ello que el principio de las diferentes pruebas existentes para determinar la biodegradabilidad de una sustancia consiste en exponer dicha sustancia a una población mixta de microorganismos ambientalmente representativa y medir su desaparición como consecuencia de la actividad de éstos.

1.2.1 Tipos y técnicas

Existe una gran variedad de técnicas analíticas y tipos de pruebas para medir la biodegradabilidad de una sustancia. Dentro de los distintos tipos se pueden encontrar aquellas que buscan simular las condiciones de la biodegradación que se da en el ambiente de manera natural; o bien, las que representan los procesos de biodegradación en condiciones optimizadas, como en una planta de tratamiento con torres de lodos activados (biodegradación anaerobia).

Por otra parte, las técnicas analíticas utilizadas dependen básicamente del tipo de biodegradabilidad que se desea determinar: primaria o última. Para la biodegradabilidad primaria, las técnicas analíticas utilizadas son específicas para cada sustancia o tipo de sustancia. Para la biodegradabilidad última, las técnicas utilizadas implican

determinaciones no específicas de la mineralización de la sustancia a probar; habitualmente, este tipo de pruebas requiere de un análisis más fácil de realizar y como se mencionó anteriormente, proveen de información muy valiosa acerca del destino final de la sustancia. Los tres parámetros a evaluar en las pruebas de biodegradabilidad última son la producción de bióxido de carbono (CO_2), consumo de oxígeno (O_2), y la reducción del carbono orgánico disuelto (COD).

Debido a la amplia diversidad de condiciones ambientales y factores que intervienen en los resultados de una prueba de biodegradabilidad, no es posible precisar un único método para su realización. Reflejo de ello es la Tabla 1.1 donde se pone de manifiesto la multiplicidad de variables involucradas.

1.3 Factores de una prueba de biodegradabilidad

En todo sistema, tecnológico o natural, existen factores pertenecientes a los elementos que lo conforman, que inciden tanto en su funcionamiento, su desempeño y los resultados que se obtienen de éste. En una prueba de biodegradabilidad, los elementos que la integran básicamente son:

- 1) Un inóculo de microorganismos degradadores
- 2) La sustancia a probar y una forma de detectar su desaparición
- 3) El tiempo de prueba

Tabla 1.1 Diferentes métodos de pruebas de biodegradabilidad (Salazar, 2006)

Método	Nombre	Parámetro	Evaluación	Alcance	Observaciones
ISO 7827 OECD 301	COD Die-away test	Remoción COD	Comparación COD al inicio y al final de la prueba	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos NV₂ y adsorbentes • C_{org} = 10-40 mg/L 	Inóculos con baja concentración de bacterias
ISO 9888 OECD 302B	Método Zahn-Wellens	Remoción COD	Comparación COD al inicio y al final de la prueba	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos NVO y solubles • C_{org} = [50-400] mg/L 	Difícil diferenciar entre la biodegradación y la eliminación abiótica por adsorción.
ISO 9439 OECD 301B	Evolución CO ₂	CO ₂ producido	Comparación CO ₂ producido y CO ₂ teórico	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos NVO • C = [10-20] mg/L COD/COT 	
ISO 14593	Head Space CO ₂	CO ₂ producido a) Después de acidificar la fase gaseosa. b) Después de alcalinizar en forma de CID	Comparación CO ₂ producido y CO ₂ teórico	<ul style="list-style-type: none"> • Sustancias volátiles 	Información adicional de compuestos solubles por la medición de remoción de COD
ISO 9408 OECD301 C OECD 302 C	Respirométrica	DBO en un respirometro cerrado	Comparación de la DBO con el OD teóricos o la DQO	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos solubles e insolubles • C_{org} = 100 mg/L ó • C_{org} = 100 mg/L 	
ISO 10700 ^a OECD 301D	Botellas cerradas en 2 fases	Oxígeno medido con un electrodo	Comparación de la DBO con el OD teóricos o la DQO	<ul style="list-style-type: none"> • C bajas ≤ 2mg/L • Compuestos volátiles y tóxicos 	Inóculos con baja concentración
ISO 10707 OECD 301F	Botellas cerradas	Medición continua del consumo de oxígeno	Determinación de las cinéticas de degradación	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos solubles, insolubles y volátiles 	
ISO 9887 OECD 302A	Prueba de todo activado semicontinuo	COD antes y después del diario llenado y vaciado en los recipientes	Determinación de la BU, TP = 26 semanas	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos solubles y NV y orgánicos adsorbentes • C = [20-50] mg/L 	Análisis adicionales para determinar la BP.
ISO 11733 OECD 303	Ensayo de simulación de lodos activados	COD o DQO en el influente, efluente y en un blanco	Calculo de la BU, TP = 12 semanas	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos NVO, solubles • y/o dispersos, • C_{org} = [10-20] mg/L 	Alto potencial de biodegradación, usado para aclimatación de un inóculo
ISO11724	Biodegradación anaerobia	P o V de la producción del biogás (CH ₄ y CO ₂) y del CI	BU por comparación del biogás producido con el teórico. TP= 60 días	<ul style="list-style-type: none"> • C = [20-100] mgCl/L 	
ISO14592	Prueba en aguas de bajas concentraciones	Simulación de condiciones estáticas o dinámicas en sistemas de agua superficiales	Determinación de BP o cinéticas de biodegradación con indicador o análisis espectroscópicos	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos solubles, NV y para los cuales su determinación analítica está disponible 	Pruebas llevada a cabo bajo condiciones reales, y simulación de ríos
OECD 306	Biodegradación en agua de mar	Remoción COD, en botellas en aplicación	Comparación COD al inicio y al final, TP = 28 a 60 días	<ul style="list-style-type: none"> • C_{org} = [2-40] mg/L 	Agua de mar usada como medio

BU = Biodegradabilidad Última
BP = Biodegradabilidad Primaria
C = Concentración
CI = Carbono Inorgánico
CID = Carbono Inorgánico Disuelto
COD = Carbono Orgánico Disuelto
COT = Carbono Orgánico Total
NV = No volátiles
NVO = No Volátiles Orgánicos
TP = Tiempo de Prueba

Cada uno de estos elementos contiene factores determinantes en los resultados de la biodegradación, los cuales se describen a continuación:

- **Biológicos:** están integrados por el origen y cantidad del inóculo que determina la existencia de diferencias en las poblaciones de bacterias y su adaptación al sustrato a degradar, así como su composición y la concentración de nutrientes en el medio. (Moreno, 2003)
- **Químicos:** largo de la cadena de la sustancia a degradar, la clase, número y posición de los constituyentes en la molécula a degradar. (Ambríz,1998)
- **Fisicoquímicos:** incluyen temperatura, grado de dispersión de la sustancia en el medio, pH, oxígeno disuelto (OD), solubilidad y/o volatilidad de la sustancia a tratar.
- **Tecnológicos:** dentro de esta categoría se encuentra la concentración de la sustancia a probar; ausencia o presencia de otra sustancia degradable en el mismo medio (para los procesos cometabólicos), condiciones y propiedades de los sistemas de prueba; y finalmente la relación inicial del sustrato (S_0) con la cantidad inicial de microorganismos (X_0), expresada como S_0/X_0 . (Moreno y Buitrón, 1997)

1.4 Etapas de una prueba de biodegradabilidad

La forma de medir la biodegradación se expresa generalmente por medio de una curva de degradación, donde se grafica el proceso de degradación a lo largo de sus diferentes etapas, ligadas a su duración en el tiempo. Los criterios de duración de la prueba varían dependiendo de su tipo y de los factores antes descritos, por lo que las fases o etapas de una prueba de biodegradabilidad son específicas para cada sustancia a probar (Pagga, 1997). Con fines demostrativos se muestra en la **Figura 1.2** una curva de degradación, donde se pueden distinguir claramente las etapas de una prueba de biodegradabilidad.

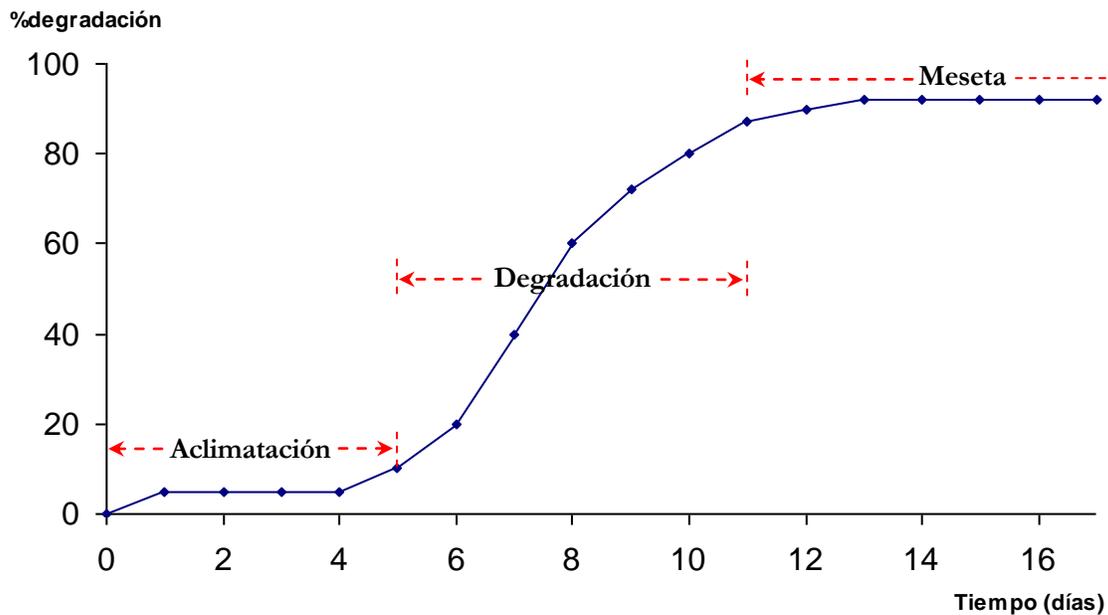


Figura 1.2 Etapas de una prueba de biodegradabilidad

En la **figura 1.2** se distinguen las siguientes fases:

- **Aclimatación:** en esta etapa el inóculo se adapta a la sustancia de prueba y a la duración de esta fase se le denomina tiempo de latencia. (Pagga, 1997)
- **Degradación:** es la etapa durante la cual los microorganismos usan la sustancia como alimento y, se desarrolla el crecimiento de estos; generalmente presenta una respuesta lineal en el tiempo. (Pagga, 1997)

Meseta: está fase es de particular importancia, puesto que es donde se decide el fin de la prueba, ya que la degradación ha terminado. El tiempo de paro es de propósito específico para cada tipo de prueba; usualmente la decisión de cuándo parar la prueba se lleva a cabo mediante los estándares existentes, que en la mayoría de los casos ha sido establecida de forma arbitraria. (Cardinale, 1996; Pagga, 1997).

Por otra parte, el porcentaje de degradación es indicado mediante diferentes parámetros. Estos corresponden directamente con el proceso seguido para detectar y medir la biodegradación.

Capítulo 2

2.1 Pruebas de biodegradabilidad anaerobia

En las pruebas de biodegradabilidad anaerobia se analiza y determina el porcentaje de degradación de una sustancia en condiciones controladas. Generalmente, este tipo de pruebas busca simular las condiciones prevalentes en una planta de tratamiento de aguas residuales que utiliza digestores con lodos activados. En ellas se determina la biodegradación última, ya sea por análisis químico de productos intermedios y finales; o bien, mediante la cuantificación de la producción de biogás. Los equipos y métodos para determinar este tipo de biodegradación pueden ser clasificados por la forma mediante la cual se llevan a cabo. Los métodos gasométricos miden la cantidad de biogás producto de la biodegradación y los métodos químicos la evalúan por un análisis químico de consumo de substrato y/o de productos.

Los métodos que utilizan un análisis químico requieren determinar parámetros mediante técnicas analíticas dónde se utilizan una gran variedad de instrumentos y procedimientos. Es por ello que su automatización requiere de sistemas muy elaborados y de alto costo. Como producto de lo anterior, la implementación de este tipo de equipos no contempla réplicas en una misma prueba, aún cuando es preferible la realización de varias repeticiones para obtener resultados confiables.

Por otra parte, los métodos gasométricos son de fácil implementación, ya que en ellos se mide la producción de biogás. Estos métodos cuantifican el biogás producido de forma volumétrica o manométrica. Los métodos manométricos hacen uso de transductores de presión, lo cual hace que sean susceptibles para la automatización. Existen varios equipos desarrollados bajo este principio, los cuales siguen los lineamientos de la norma ISO 11734, establecida el año de 1995.

Inicialmente, los métodos manométricos eran realizados manualmente, de lo cual resultaban problemas que se describirán posteriormente. Básicamente, el proceso para realizar una prueba de biodegradabilidad anaerobia, que es evaluada por métodos manométricos, consiste en medir la presión del biogás producto de la biodegradación a temperatura constante. El incremento excesivo de presión en el reactor provoca inhibición en la producción de biogás; por este hecho, la presión dentro del reactor se mantiene cercana a la presión atmosférica realizando purgados continuos. Un purgado frecuente puede resultar, por otro lado, indeseable; puesto que si no se hace de manera controlada puede afectar negativamente el resultado de la prueba, especialmente si se realiza de manera manual. De aquí se desprende la inquietud por automatizar este tipo de pruebas.

2.2 Prueba automatizada de biodegradabilidad anaerobia del Instituto de Ingeniería UNAM.

La prueba de biodegradabilidad anaerobia utilizada en la coordinación de Bioprocesos Ambientales, y recientemente en el Laboratorio de Investigación en Procesos Avanzados de Tratamiento de Aguas, del Instituto de Ingeniería UNAM, está basada en la cuantificación del biogás producido, utilizando para ello métodos manométricos conforme a la norma ISO 11734.

Para realizar una prueba de biodegradabilidad anaerobia se sigue el proceso que se describe a continuación:

Primero, se deposita la sustancia de interés junto con el inóculo en un recipiente cerrado herméticamente, con el fin de atrapar el biogás efecto de la biodegradación y además evitar la presencia de oxígeno en el medio y obtener

con ello bajas concentraciones de este durante el proceso de biodegradación. Luego, se registra el incremento de presión en el recipiente utilizando un manómetro. El proceso se realiza a temperatura controlada, y de forma sucesiva hasta que se obtiene una presión constante por un tiempo determinado (etapa de meseta), lo que indica el fin de la biodegradación. Posteriormente, las lecturas de presión registradas se someten a tratamiento para determinar la producción total de biogás, mediante la ecuación de gases ideales, y de cada producto en porcentaje (CO_2 y CH_4 principalmente).

2.2.1 Fundamento de la automatización

El hecho de realizar la prueba de forma manual involucra una serie de dificultades técnicas que a su vez acarrearán un alto grado de incertidumbre en los resultados obtenidos. Los principales problemas de una prueba manual se resumen, por orden de importancia, en:

- Fugas de biogás, debido a la toma de lecturas de presión que afectan de manera directa al sistema cerrado.
- Limitaciones de monitoreo durante el desarrollo de la prueba.
- Modificación de las condiciones o factores que afectan la prueba (principalmente temperatura), como resultado de la manipulación constante para toma de lecturas del recipiente contenedor.

Es por ello que se planteó la necesidad de implementar un sistema automatizado, con el fin de solucionar los problemas y dificultades de este tipo de prueba.

2.2.2 Primera versión

La primera versión automatizada para realizar pruebas de biodegradabilidad anaerobia desarrollada en el Instituto de Ingeniería (1994) estaba estructurada como se ilustra en el siguiente diagrama de la **Figura 2.1**

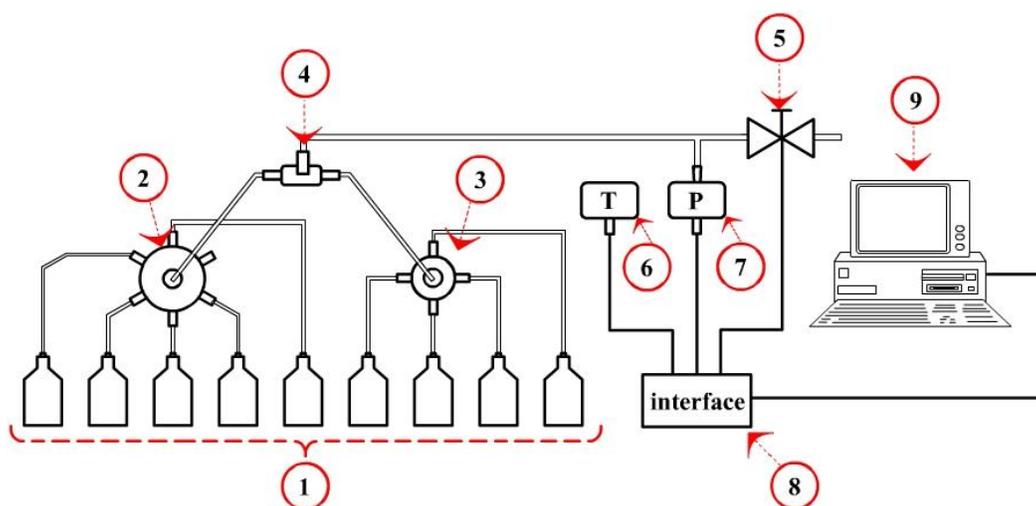


Figura 2.1 Esquema del sistema anterior

Los elementos que lo conformaban, referenciados a la numeración en el diagrama, son:

1. 9 reactores de prueba
2. Válvula electromecánica terciaria (6 entradas, 1 salida)
3. Válvula electromecánica terciaria (4 entradas, 1 salida)
4. Válvula electromecánica secundaria (2 entradas, 1 salida)
5. Válvula electromecánica primaria o de purgado (1 entrada, 1 salida)
6. Transductor de temperatura
7. Transductor de presión (0-30 psi)
8. Tarjeta de adecuación de señal

9. Tarjeta de adquisición de datos y programa desarrollado en Turbo C++

El sistema automatizado estaba desarrollado bajo los fundamentos de un sistema de adquisición de datos, debido a la gran cantidad de información y destino final de ésta. El sistema se encargaba de realizar las tareas de medición, acondicionamiento y registro por medio de una PC, además de controlar las operaciones de los dispositivos actuadores.

2.2.2.1 Funcionamiento

El funcionamiento, *grosso modo*, para el registro de una lectura de presión se hacía activando la ruta correspondiente para liberar el flujo de biogás del reactor mediante la activación de las válvulas terciaria y secundaria hasta el transductor de presión. Una vez transcurrido un tiempo de estabilización en el subsistema del reactor a muestrear, la lectura de presión y de temperatura se registraba, posteriormente se realizaba un purgado abriendo la válvula principal. Finalmente, las válvulas se cerraban y se repetía el proceso con el reactor siguiente, y así hasta muestrear los nueve reactores de que constaba el sistema. El muestreo se realizaba por lote completo; esto es, que periódicamente se muestreaban todos los reactores cada vez que se cumplía el tiempo de muestreo fijado por el usuario.

El programa estaba realizado en lenguaje Turbo C++. Este programa tenía la función de registrar la presión y la temperatura en un archivo, estableciendo para ello la comunicación con una tarjeta de adquisición de datos; desplegar la información de las lecturas y cálculos en forma tabular, realizar el control de las válvulas y temporizar la prueba tanto en su duración como en el periodo de registro de presión.

2.2.3 Segunda versión

Debido a las limitaciones, principalmente por software, se desarrolló una segunda versión. En esta segunda versión (2006), se conservó básicamente la estructura y metodología del registro de lecturas. El programa se reemplazó por una versión desarrollada en LabVIEW v5, de la cual sólo se contaba con el programa ejecutable. Esta versión añadió un modo más al sistema, el cual tenía la finalidad de detectar fugas en las rutas de flujo de biogás.

Está versión es sobre la cuál se estudió y evaluó de manera detallada el funcionamiento total del equipo; sometiendo a un análisis exhaustivo tanto la parte correspondiente a software como hardware. Los resultados de este análisis conforman la base para el planteamiento de la reingeniería total del equipo. Estos resultados se citan a continuación, agrupándolos en dos campos: ventajas y desventajas.

La forma de llevar a cabo el registro de presión de los reactores es la misma que la descrita para la versión 1. Esto se debe tener presente para el análisis que sigue.

2.2.3.1 Ventajas.

Como se ya se ha mencionado, el equipo conservó básicamente la estructura y los procedimientos seguidos para la realización de la prueba. Dentro de las ventajas inherentes al funcionamiento del sistema, la más importante, aparte de la automatización, es que el sistema evita la inhibición de producción de biogás debido a altos valores de presión dentro del reactor; ya que cada vez que se toma una lectura de presión, el reactor es compensado posteriormente con la presión atmosférica abriendo la válvula de purgado. Otra característica importante es la instauración de un nuevo modo de funcionamiento del equipo; la detección de fugas evita resultados erróneos y

proporciona al experimentador información determinante para las condiciones de uso del equipo, así como para su mantenimiento.

Otras ventajas son las concernientes a la utilización del equipo por parte del usuario. En este campo, lo más importante es el diseño de una interfaz gráfica explícita. La ventana principal que se muestra durante la ejecución del programa (**Figura 2.2**) contiene datos relevantes de la prueba, lo que permite al usuario interactuar, de manera visual, mientras la prueba está en desarrollo.

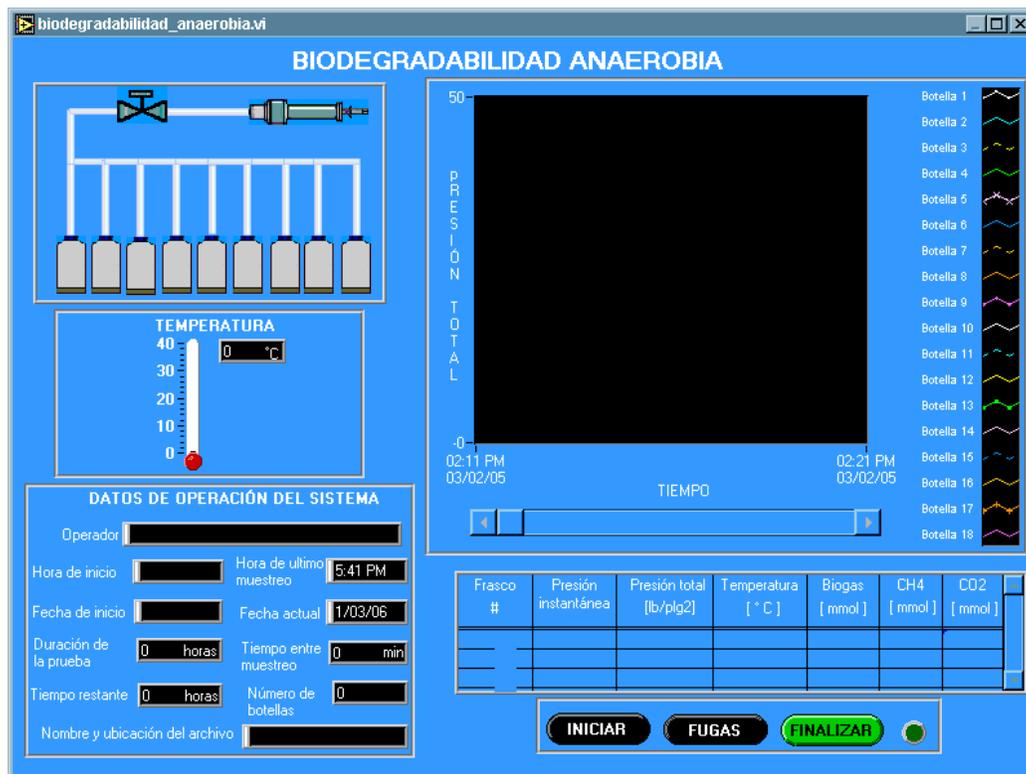


Figura 2.2 Panel frontal de la versión anterior del programa

Estas características positivas, tanto de funcionamiento del equipo como de su utilización, son tomadas en cuenta para cumplir el cometido de mejorar el equipo existente.

2.2.3.2 Desventajas

Aún cuando se modificaron algunas de las limitantes de la primera versión, el equipo presentaba problemas en su funcionamiento. El procedimiento de toma de lectura de presión, que es la función principal del equipo, contiene limitaciones en la forma en que se estructura, ver **Figura 2.3**. Con respecto a este punto, que es de vital importancia para el desempeño del equipo, se hacen las siguientes observaciones.



Figura 2.3 Conexiones dentro del gabinete

- La elección de los elementos utilizados (principalmente válvulas multiplexoras), hace que existan excesivas interconexiones para el flujo de biogás, lo que resulta en una mayor probabilidad de fugas.
- Se utiliza un transductor de presión inadecuado en rango, que es de 0-30 psi. La presión máxima que llega al transductor durante las diferentes etapas de la biodegradación es aproximadamente 3 psi debido al cuidado de no inhibir la producción de biogás haciendo un purgado del reactor.

- Cada vez que se toma una lectura de algún reactor es necesario purgar el subsistema correspondiente como resultado del uso de válvulas multiplexoras, aún cuando la presión fuera tal que no produjera inhibición; esto limita el periodo de tiempo con el cual la presión es monitoreada.
- La montura de las válvulas multiplexoras a una placa de metal, mediante cinturones que las fijan, son propensas a moverse de lugar cuando el gabinete es transportado. Esto hace que las conexiones de las mangueras se debiliten o ensanchen provocando fugas.
- La parte correspondiente a los circuitos que controlan las válvulas multiplexoras, en la tarjeta de adecuación de señal, tiene valores inadecuados de corriente, lo cual provoca calentamiento en ellas y una afectación directa al sistema de registro de presión y al solenoide de las válvulas. Por este motivo se añadió un ventilador dentro del gabinete, como un paliativo para evitar dicho calentamiento.
- La tarjeta de adecuación de señal no está hecha tomando en cuenta las necesidades del sistema y tiene un exceso de circuitería. Como se muestra en la **Figura 2.4**, en la parte superior de la tarjeta se tiene una gran cantidad de elementos de circuito que no se utilizan.

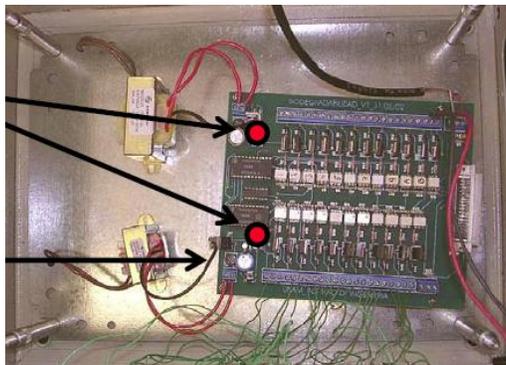


Figura 2.4 Imagen de la tarjeta de adecuación de señales

Por otra parte, el programa desarrollado en LabVIEW v5 posee varias limitantes; algunas son consecuencia de la estructura del equipo y otras atañen directamente a la programación. Las principales se enlistan a continuación por orden de importancia.

- El modo de detección de fugas se realiza en un tiempo de 9 minutos, tomando tres lecturas sucesivas de cada reactor a presión constante. Aunque el subsistema de cada reactor es expuesto a un tiempo relativamente mucho menor a éste para el flujo de biogás durante el desarrollo de una prueba; no considera una posible fuga de biogás en las interconexiones entre el reactor y la válvula terciaria que le corresponde. Si se da este caso, no es posible detectarlo.
- El monitoreo de la presión en determinado reactor se hace sólo en el instante en que se cumple el periodo de registro de lectura.
- El periodo de lectura y registro de presión están unidos, lo que lleva a limitaciones importantes en el número de registros de presión y como consecuencia en el monitoreo de los parámetros a medir durante la prueba. El periodo de muestreo mínimo para tomar una lectura y registrarla es de 30 minutos, con incrementos de igual magnitud.
- El arreglo de los datos en el archivo hace que su tratamiento y la obtención de resultados se tornen difíciles y laboriosos para el usuario.
- El algoritmo utilizado para el registro de presión en los reactores tiene una selectividad restringida; el usuario sólo puede elegir el número de reactores de la prueba, más no cuales utilizará.

- Para realizar una prueba, el usuario es expuesto a la introducción de datos distribuidos en 8 ventanas, que aparecen sucesivamente, lo cual es abrumador. La ventana principal contiene campos difíciles de visualizar e información inútil.

De forma resumida se puede concluir en primer lugar que la estructura del equipo, al utilizar un solo transductor de presión, limita de manera determinante su desempeño, provocando fallas y un mantenimiento laborioso. En segundo lugar, lo inadecuado de sus componentes hace que se implementen soluciones paliativas a problemas creados, como efecto de su diseño; ejemplo de ello es la utilización de un ventilador y el modo de programa para detectar fugas. Finalmente, el diseño del programa contiene defectos que dificultan de manera innecesaria la ejecución y obtención de resultados para el usuario.

2.3 Áreas de mejora

El desarrollo de nuevas tecnologías en el campo de la electrónica y el cómputo posibilita de manera importante el reemplazo de componentes y la reingeniería total del equipo, especialmente considerando que el modelo existente hasta el momento data de hace por lo menos 12 años. Las decisiones para establecer las áreas de mejora en el equipo fueron realizadas de manera conjunta con miembros de la Coordinación de Bioprocesos Ambientales del Instituto de Ingeniería; pues son ellos quienes toman el papel de usuario en el equipo. Las áreas de mejora se dividen en dos vertientes: las pertenecientes al funcionamiento del equipo y las que responden a las necesidades de los usuarios.

2.3.1 Funcionamiento del equipo

Basándose en el equipo existente y en comparaciones de éste con otros referenciados en la literatura, se pudieron establecer los requerimientos principales de operatividad del equipo. El proceso de automatización contempla estas bases. Las áreas de mejora en cuanto a funcionamiento del equipo se enfocan a:

- Confiabilidad de resultados obtenidos,
- Disminución de fallas,
- Evitar inhibición en producción de biogás debido a la presión acumulada,
- Incrementar el seguimiento de la presión en su evolución temporal en los reactores,
- Ampliar el rango de sensibilidad,
- Facilitar el mantenimiento,
- Portabilidad.

En una primera instancia, se planteó seguir manteniendo la arquitectura del equipo. Esto es, seguir manteniendo la estructura básica de hardware y sólo mejorar la parte correspondiente al software.

Haciendo un análisis de este tipo de arquitectura (en la cual se hacía uso de un solo transductor de presión y un arreglo de válvulas multiplexoras mediante las cuales se seleccionaba la ruta para liberar el flujo de biogás, y que este fuese medido), sus limitaciones y el costo que implicaba el arreglo de válvulas multiplexoras, se decidió buscar una estructura alternativa. Es así como se planteó la reingeniería total del equipo, sustituyendo la arquitectura de hardware ya existente, por una mucho más rentable tanto operativamente, como en su costo.

2.3.2 Uso del equipo

En cuanto al uso del equipo por parte del usuario, se valoró esencialmente la facilidad con la que este puede operarlo para llevar a cabo una prueba, procurando que no necesariamente se requiera una instrucción especializada en el uso del mismo. Ya que la operación se realiza mediante el uso de una aplicación de software, los puntos principales a mejorar en el uso del equipo están intrínsecamente ligados al uso del programa. Los puntos principales a mejorar fueron:

- Interacción del usuario en la ejecución de programa,
- Despliegue de información en forma tabular y gráfica,
- Adecuación de datos en el archivo de reporte para su tratamiento y análisis,
- Interfaz gráfica para el usuario.

La disponibilidad del software LabVIEW v7.1, el cual es una herramienta idónea para el desarrollo de aplicaciones de instrumentación y tareas de adquisición de datos, hizo que se decidiera desarrollar la aplicación en este lenguaje. Dentro de las innovaciones que contiene el software, se añadieron las siguientes tareas:

- Control de máxima presión permitida en los subsistemas. Evitar la inhibición de producción de biogás por la presión acumulada en el reactor es fundamental; en el equipo anterior no se tenía control alguno de los valores de presión máxima permitida en los reactores, por lo que en algunas ocasiones se purgaba sin necesidad alguna o incluso se podía correr el riesgo de no purgar a tiempo.
- Control activo del periodo de registro de datos. Esto es, que el usuario tenga la posibilidad de modificar el periodo de tiempo con el cual se registran los datos mientras el programa se ejecuta y no sólo definirlo al inicio de su ejecución.

- Selectividad de reactores a ser muestreados. El hecho de seleccionar o no un reactor es importante, con el fin de no generar información inútil en el archivo de registro.
- Modo de control de paro de registro de presión y/o de programa en forma automática por tiempo de estabilización de presión. Esto se refiere a la posibilidad de activar un modo de paro automático durante la ejecución del programa, cuando se registre una presión constante durante un lapso de tiempo, definido por el usuario, en los subsistemas previamente seleccionados.

2.4 Aportes

La existencia de versiones anteriores para la automatización de una prueba de biodegradabilidad anaerobia y la experiencia que se toma de su implementación y uso contribuyen en gran medida a este trabajo de tesis. Cabe recordar que se diseña un equipo con el mismo objetivo: automatizar una prueba de biodegradabilidad anaerobia.

El aporte de este trabajo está planteado como un proceso de reingeniería, donde se busca como objetivo principal que el Instituto de Ingeniería de la UNAM, y concretamente su Laboratorio de Investigación en Procesos Avanzados de Tratamiento de Aguas, disponga de un equipo automatizado que ofrezca una mejora integral para la realización de pruebas de biodegradabilidad. Con un nuevo diseño del equipo se busca mejorar y suprimir fallas de versiones antes realizadas, valiéndose del uso de nuevas tecnologías y de la experiencia tomada. El equipo, tanto en sus elementos de hardware como de software, debe ofrecer una mejora en: los resultados obtenidos y su análisis, el desempeño del sistema y su arquitectura y finalmente, la interacción del usuario con el proceso seguido para la realización de la prueba.

Capítulo 3

3.1 Conceptos básicos de medición

En la época actual el desarrollo de la ciencia y de la tecnología hace imprescindible el uso continuo de instrumentos de medición. El uso generalizado y creciente de la tecnología que funciona con energía eléctrica ha sido el camino a seguir desde que se cimentaron los principios que la rigen. La manera en que se mide, o bien, se cuantifica una variable física obteniendo una señal eléctrica como respuesta se basa principalmente en el uso de transductores. Cuando la cantidad de operaciones y/o el volumen de información proveniente de éstos son elevados, así como cuando el destino final de la información así lo requiere, se hace uso de sistemas de adquisición de datos.

En este proyecto debido a que las mediciones se realizan automáticamente mediante transductores de presión, el experimentador no interviene en dichas mediciones y se convierte en observador del proceso que se lleva a cabo dentro de los reactores. Por lo tanto se minimizan los errores graves provocados por una mala lectura. A continuación se incluyen algunas definiciones que consideramos básicas para tratar lo concerniente a medición.

- *Exactitud*: aproximación con la cual la lectura de un instrumento se acerca al valor real de la variable medida.
- *Precisión*: medida de la reproducibilidad de las mediciones; esto es, dado el valor fijo de una variable, la precisión es una medida del grado con el cual las mediciones sucesivas difieren una de otra.
- *Sensibilidad*: relación de la señal de salida o respuesta del instrumento respecto al cambio de la entrada o variable medida.
- *Resolución*: cambio más pequeño en el valor medido al cual responde el instrumento.

- *Error*: desviación del valor real de la variable medida.
- *Errores graves*: son en gran parte de origen humano, como mala lectura de los instrumentos, ajuste incorrecto y aplicación inapropiada, así como equivocaciones en los cálculos.
- *Errores sistemáticos*: se deben a fallas de los instrumentos, como partes defectuosas o gastadas, y efectos ambientales; una vez que ocurren, lo hacen siempre en la misma proporción o cantidad.
- *Errores aleatorios*: ocurren por causas que no se pueden establecer directamente debido a variaciones aleatorias en los parámetros o en los sistemas de medición; son impredecibles.

3.2 Sistemas de adquisición de datos

En un sistema de adquisición de datos es necesario que se cuente con un procesador rápido y que pueda manejar una gran cantidad de datos, por esto se utiliza una computadora personal que puede hacer todas las operaciones en el menor tiempo posible y que almacene la información de forma segura y confiable, además de permitir que se analicen los datos del proceso en el momento en que se generan. En este caso se trata de un sistema de adquisición de datos digital, cuyas partes que lo componen se muestran en la Fig. 3.1.

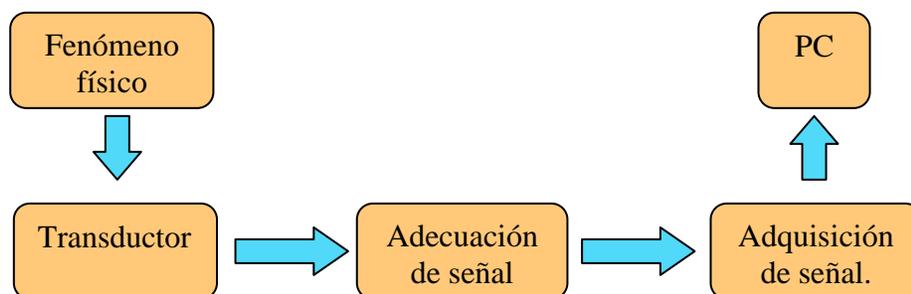


Figura 3.1 Bloques principales de un sistema de adquisición de datos por computadora

A continuación se explicarán a detalle cada una de las partes que componen un sistema de adquisición de datos como el del diagrama a bloques de la **Figura 3.1**, el cual utiliza una computadora y los componentes de cada bloque que fueron utilizados en este proyecto.

3.2.1 Transductores

Un transductor es un dispositivo que transforma un tipo de energía a otra, generalmente de tipo eléctrico. Existe una gran variedad de transductores que se pueden clasificar por el tipo de variable física que miden o bien, por el principio eléctrico que los rige. En la realización de este proyecto se analizaron y utilizaron dos tipos: transductores de presión y transductores de temperatura. A continuación se realiza una breve descripción de estos dos tipos de transductores.

3.2.1.1 Transductores de presión

La presión se detecta principalmente mediante elementos sensores de desplazamiento o deformación espacial, que ofrecen a la presión (fuerza) una superficie (área) de actuación. La presión se mide y define como la fuerza por unidad de área. Cuando esta fuerza no está equilibrada por otra fuerza igual actuante en la superficie opuesta al elemento sensor, el elemento entra en flexión o deformación. Esto se traduce, mediante un elemento transductor, a una señal proporcional de tipo eléctrico. Aunque todos los elementos sensores de presión realmente responden a un cambio de presión diferencial a través de ellos, los transductores pueden ser diseñados para medir tanto presiones absolutas, manométricas, como diferenciales; dependiendo de la presión de referencia mantenida o admitida por el elemento del lado de referencia. Se acostumbra denominar a la presión normalmente más baja y con menor variación presión de referencia y a la otra, presión de medida; a pesar de que esta última puede variar entre niveles tanto mayores como menores de la presión de referencia.

El lado de referencia de un elemento sensor de presión absoluta se encuentra al vacío y está herméticamente sellado. Para la presión manométrica se toman medidas con el lado de referencia actuado por la presión ambiental. Los elementos sensores de presión diferencial flexionan con el aumento de la diferencia entre dos presiones, las cuales pueden variar indistintamente.

Los tipos de transductores de presión pueden basar su principio de funcionamiento en el cambio de parámetros de la capacitancia, inductancia, resistencia, o frecuencia con la que una señal eléctrica es producida; estos cambios se ven reflejados de manera directa o indirecta en la señal eléctrica de respuesta que ofrece el transductor.

Transductor de presión SX15GD2

El transductor utilizado para medir presión en el sistema está basado en el arreglo de galgas extensométricas tipo puente Wheatstone de 4 brazos (**Figura 3.2**). Las galgas extensométricas son altamente sensibles a la deformación mecánica, lo que causa una variación en su valor de resistencia eléctrica. Las galgas están montadas directamente sobre la cara de un diafragma de silicio grabado químicamente y dispuestas en pares; dos medidores orientados radialmente en el diafragma y los dos restantes circunferencialmente. La aplicación de una fuerza sobre una cara del diafragma produce que esta se flexione y que a su vez las galgas cambien su valor de resistencia, las galgas orientadas radialmente en el diafragma se someten a una elongación, esto produce el cambio de potencial en el arreglo resistivo del circuito puente.

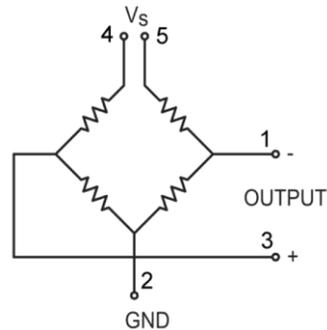


Figura 3.2 Arreglo resistivo que utiliza el transductor de presión

Este transductor se alimenta con 12 V_{DC} y tiene bajo consumo de energía, su velocidad de respuesta es de tan sólo 100µs y además un empaquetado tipo DIP que hace más fácil su montaje en circuitos impresos (**Figura 3.3**); la única desventaja que encontramos en su operación es que el rango de voltaje a la salida va de 0 -110mV, esto es para una presión de 0 psi a 15 psi correspondientemente, este inconveniente se solucionó amplificando el voltaje.

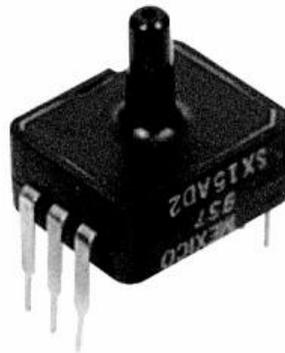


Figura 3.3 Empaquetado de transductor de presión tipo DIP

3.2.1.2 Transductor de temperatura LM35

El sensor de temperatura de precisión LM35 es un circuito integrado que proporciona una salida de voltaje proporcional a la temperatura en grados Celsius. Su principio de funcionamiento está basado en el funcionamiento del transistor bipolar de juntura (TBJ). Cuando la temperatura aumenta en el transistor, los electrones de valencia de los

materiales semiconductores que lo conforman, son más fácilmente desprendibles por un potencial eléctrico. Esto debido a que la temperatura suministra energía a los átomos de los materiales semiconductores produciendo un efecto de cambio en las corrientes que circulan por las terminales del transistor y las cuales son inversamente proporcionales al calor al cual se expone el transistor.

Entre sus características más sobresalientes de este componente podemos mencionar que cuenta con una salida de voltaje lineal y que no necesita calibración alguna ya que está calibrado de fábrica y la razón de cambio es de $10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, también cuenta con un amplio rango de voltaje de alimentación que va de 4 a 30 volts.

3.2.2 Adecuación de señal

La etapa de adecuación de señal tiene el fin de modificar y/o eliminar características de la señal proveniente del transductor de presión; características indeseables como ruido y en algunos casos offset, son suprimidas en la medida de lo posible mediante filtros. Para la mayoría de los casos, en esta etapa se realiza la amplificación de la señal, y así obtener un rango más adecuado para la tarjeta de adquisición de datos y obtener una mayor resolución al convertir a valores digitales. En resumen, se puede decir que en esta etapa de un sistema de adquisición de datos, se prepara a la señal del transductor por medio de 3 procesos: filtrado, amplificación y aislamiento para ser manipulada digitalmente. A continuación se definen algunos conceptos básicos de electrónica.

Filtrado. Los filtros ya sean analógicos o digitales tienen la función de eliminar las frecuencias indeseables en una señal.

Amplificación. Generalmente los transductores proporcionan señales de voltaje de baja amplitud, mismas que son vulnerables al ruido ambiental que provoca errores de

medición; por lo tanto es recomendable amplificar esta señal lo más cerca posible del transductor. Esto nos ayuda a suavizar las variaciones de la señal debido a ruido, y es independiente de la amplificación que se puede realizar en la tarjeta de adquisición de datos (TAD) porque ahí no podemos eliminar el ruido, sino ajustar el rango dinámico de la señal para aumentar la resolución de la conversión Analógico-Digital.

Aislamiento. Cuando se manejan señales que no son compatibles con el rango de voltajes que acepta la tarjeta de adquisición, ya sea porque son de AC o por su amplitud, se necesitan acoplar éstas para no dañar la tarjeta de adquisición. Esto se logra utilizando opto-acopladores y lo mismo sucede con las señales de salida de la tarjeta que se utilizan para controlar actuadores, válvulas, motores, etc. Debido a que las salidas digitales de la tarjeta solamente pueden alimentar 200mA, únicamente se utilizan como señales de control para habilitar o deshabilitar otros dispositivos. Para adaptar las señales a una TAD, podemos hacer uso de varios circuitos, los más utilizados son los amplificadores operacionales que son circuitos integrados cuya relación de entrada/salida se define gracias a la configuración que se elija de acuerdo con los requerimientos de la aplicación.

3.2.3 Adquisición de señales

En esta etapa se utiliza por lo general una tarjeta ya sea interna en la PC (Bus de expansión PCI) o externa (usb o serie) , cuyas tareas consisten en obtener las señales analógicas provenientes de los dispositivos transductores, procesarlos de manera que se puedan interpretar correctamente esos datos y finalmente almacenarlos en un archivo en el disco duro.

Debido a la gran cantidad de aplicaciones en las que se utilizan estas tarjetas hoy en día, las podemos encontrar con diferentes características. Para efectos de este

proyecto, nos fue asignada la tarjeta usb-6008 de la empresa National Instruments, esto debido a que la Coordinación de Bioprocesos Ambientales del Instituto de Ingeniería ya contaba con dicho dispositivo. La **tabla 3.1** enumera sus principales características.

Características	USB-6008
Resolución	11 bits
Velocidad máxima de muestreo	10k muestras/seg
Canales Analógicos de entrada	8
Canales Analógicos de salida	2
Canales digitales de entrada/salida	12

Tabla 3.1 Características principales de la USB6008 de NI

Se puede observar en la **Figura 3.4** un diagrama de bloques con las características del hardware de la tarjeta, el cuál hace explícito su funcionamiento para el caso de señales analógicas de entrada.

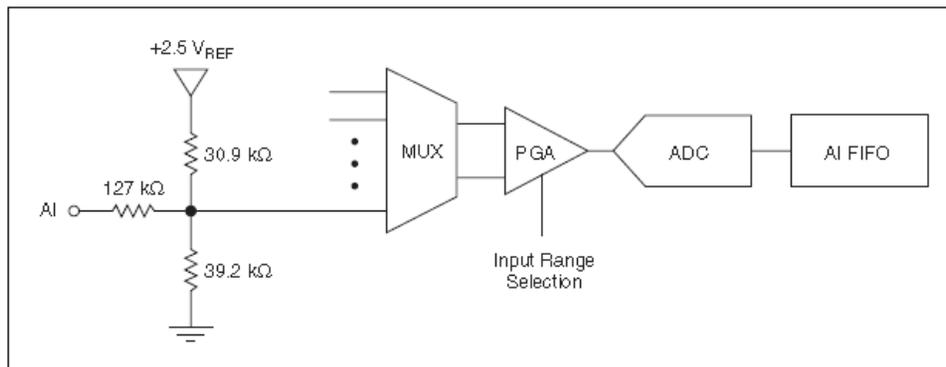


Figura 3.4 Diagrama eléctrico para canales analógicos de entrada de la TAD NI USB 6008

La tarjeta cuenta con un convertidor analógico-digital de aproximaciones sucesivas. Para efectos de esta tarjeta, la señal analógica debe entrar en el rango de -10 a 10 volts en el caso de configurar la entrada como diferencial y de 0 a 20 volts para el caso de no

diferenciales. Al llegar la señal al convertidor este debe comparar dicho voltaje e ir modificando el registro de conversión hasta que finalmente obtenemos en el registro el dato de voltaje más cercano al valor de la señal de entrada. La etapa de multiplexado se encarga de habilitar los ocho canales analógicos. La selección del rango se configura mediante software (PGA), posteriormente se realiza la conversión del canal (ADC) con una resolución de 11 bits, finalmente el valor convertido es almacenado en un lote de memoria con una estructura de pila tipo FIFO.

3.3 Reingeniería del equipo

Con base en el análisis del funcionamiento del equipo existente y sus áreas de mejora, se diseñó un equipo totalmente nuevo el cual fue denominado SABiA (**Sistema Automatizado de Biodegradabilidad Anaerobia**). La arquitectura de hardware y software fueron replanteadas. Considerando que fundamentalmente el equipo es usado como un equipo de medición, se puso especial énfasis en la obtención de resultados confiables en el registro de presión.

El motivo por el cual se decidió no seguir utilizando la misma arquitectura en hardware, aparte de las limitantes antes mencionadas, es por el alto costo que representan las válvulas multiplexoras. Esta comparación de costos se discutirá posteriormente en el capítulo de resultados. Considerando las funciones que debe realizar el equipo y la tarjeta de adquisición de datos disponible, se sustituyó el arreglo de válvulas y un transductor por una arquitectura más flexible; la arquitectura básica es la que se muestra en la **Figura 3.5**. De esta forma, cada subsistema queda integrado por el reactor (A), el transductor (B) de presión y la electroválvula (C). Se mantiene un solo transductor de temperatura (D).

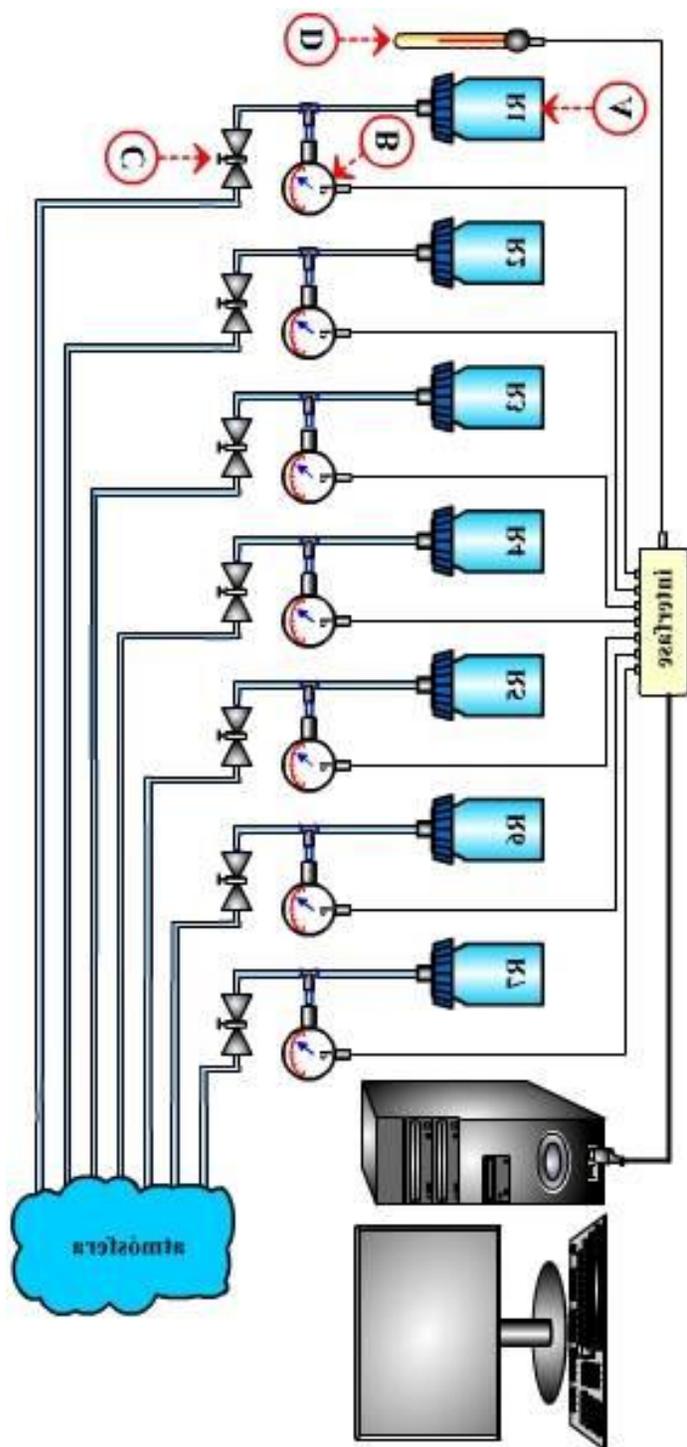


Figura 3.5 Arquitectura básica del equipo, cada subsistema (R1-R7) queda integrado por:

- A. Reactor de prueba
- B. Sensor de presión
- C. Válvula de purgado

Como se puede notar, el sistema se redujo a 7 reactores debido a las prestaciones de la tarjeta de adquisición. Pero por otra parte, el hecho de tener un transductor de presión para cada reactor, posibilita que el monitoreo de presión se haga en línea. Esta característica, tiene dos ventajas principales con respecto a la arquitectura anterior:

- ✓ Los registros de presión se llevan a cabo sin tener que purgar a los reactores obligatoriamente, mejorando las condiciones anaerobias de la prueba.
- ✓ Se puede controlar la máxima presión permitida en los reactores.

Dado que en este tipo de arquitectura se usa un transductor de presión por cada biorreactor, la operación del equipo se reduce al monitoreo constante de la presión en cada reactor durante el tiempo de prueba, registrando los valores en un archivo solamente cuando el periodo de registro, establecido por el usuario, se cumpla. Para evitar la inhibición en la producción de biogás debido a la acumulación de presión, el software desarrollado contiene un control de máxima presión permitida en los subsistemas, abriendo la válvula de purgado correspondiente únicamente cuando este valor es rebasado.

3.4 Elección y diseño de componentes

A continuación se detallan los fundamentos del diseño total del equipo, especificando para cada elemento las características y fundamentos de su elección y/o conformación.

3.4.1 Transductor de presión

Elegir el rango de presión del transductor depende directamente de los volúmenes de biogás esperados en la realización de las pruebas. La relación establecida entre rango y sensibilidad en el transductor hace que elegir el transductor adecuado tenga algunas dificultades. Por un lado, el rango debe ser lo suficientemente amplio como para cuantificar el biogás especialmente en la etapa de degradación, y por otro debe ser también lo suficientemente sensible para detectar mínimos incrementos de presión especialmente en las etapas de aclimatación y meseta.

Debido a la variabilidad de los factores involucrados en una prueba y su característica inherente de ser pruebas de tipo exploratorio, no se puede establecer *a priori* la cantidad de biogás producido en un periodo de tiempo determinado. El equipo anterior, así como la mayoría de los equipos existentes (los cuales tienen básicamente la misma estructura), resuelven esta dificultad ya sea inclinándose por una u otra opción. Es decir, tener un transductor con rango amplio y baja sensibilidad, asegurando que a presiones relativamente altas el valor sea detectado; o bien, elegir un transductor muy sensible con rango estrecho, lo que conlleva a tener una mayor presencia de oxígeno durante la realización de la prueba resultado de los purgados continuos.

En el diseño del equipo, se decidió inclinarse por la opción de que el transductor tenga un rango lo suficientemente amplio (0-10 psi) considerando los volúmenes esperados con una sensibilidad de 0.1 psi. La elección se llevó a cabo con dos fines, que la prueba

se desarrolle en presencia del mínimo oxígeno posible y, que sean posibles estudios acerca de la inhibición de producción de biogás debido a altas presiones.

Otra característica importante del transductor elegido es su empaque, tamaño y costo. Su empaque es similar a un circuito integrado posibilitando su montaje en tarjetas de circuitería electrónica. Su bajo costo hace que se pueda tener un transductor de presión para cada reactor con todas las ventajas antes citadas. Finalmente, el tamaño reducido permite disminuir el volumen del gabinete, cumpliendo con el objetivo de mejorar la portabilidad del sistema.

3.4.2 Transductor de temperatura

El transductor de temperatura es un circuito integrado transistorizado, manufacturado para aplicaciones remotas, mínimo consumo de energía y bajo costo. Su tamaño y empaque se adecuan para montarlo como una sonda. Su rango es de 0-100 °C y una sensibilidad de 0.1 °C.

3.4.3 Válvulas solenoides

Las válvulas solenoides tienen las siguientes características: montajes seguros y fáciles, reducidas en tamaño, ahorro en consumo de energía y adecuadas para el nivel de flujo requerido para el equipo. La elección de las válvulas es de vital importancia para mejorar, no sólo la portabilidad del equipo al disminuir su volumen, sino que un montaje seguro evita fugas en las interconexiones con las mangueras cuando el equipo sea transportado.

3.4.4 Tarjeta de fuente de poder y de adecuación de señal

El diseño de las tarjetas de adecuación de señal responde a las características de mejoramiento de hardware. El diseño contempla a las tarjetas de adecuación de señal en forma modular, con el fin de facilitar el mantenimiento del equipo; la reducción en su tamaño mejora también su portabilidad. Se diseñaron cuatro tipos de tarjeta, las cuales son:

- **Fuente de poder:** contiene dos fuentes de DC, una de 12 V_{DC} para alimentar a las tarjetas de sensores, y otra de 24 V_{DC} para alimentar a las válvulas, la etapa de reducción de voltaje para ambas fuentes se realiza mediante un solo transformador con derivación central montado en la misma tarjeta. Una fotografía se muestra en la **Figura 3.6**.

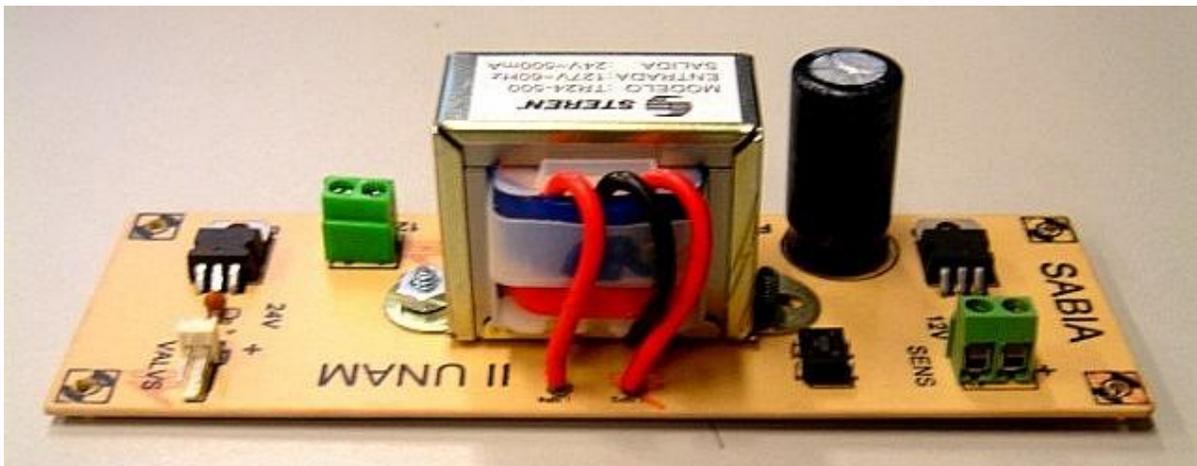


Figura 3.6 Tarjeta de fuente de poder implementada

- **Tarjeta de adecuación de señal de transductor de presión:** está integrada por un transductor de presión montado sobre la misma tarjeta, y circuitería. Para adecuar la señal del transductor de presión fue necesaria la implementación de un circuito que eliminara el offset y filtrara el ruido, para posteriormente amplificarla. Una fotografía se muestra en la **Figura 3.7**.

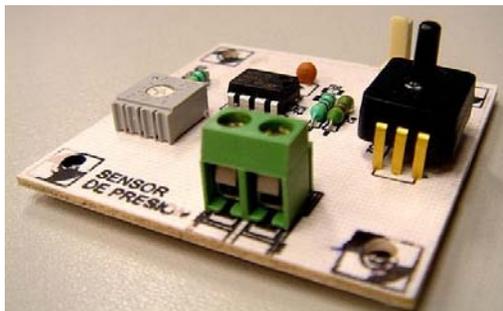


Figura 3.7 Tarjeta de adecuación de señal para transductor de presión

- **Tarjeta de adecuación de señal para el transductor de temperatura:** a diferencia de la tarjeta del transductor de presión, esta sólo contiene la circuitería para adecuar la señal del transductor de temperatura (amplificación) y un conector, ya que el transductor se debe situar en el mismo lugar que los reactores.
- **Tarjeta de adecuación de válvulas:** la señal digital proveniente de la TAD no es suficiente en valores de voltaje y corriente para activar las válvulas solenoides. Por ello se implementó su amplificación a valores adecuados mediante el uso de un circuito amplificador. Las válvulas solenoides están montadas sobre la misma tarjeta. La tarjeta contiene un LED indicador de su activación. En la figura **Figura 3.8** se muestra una fotografía.

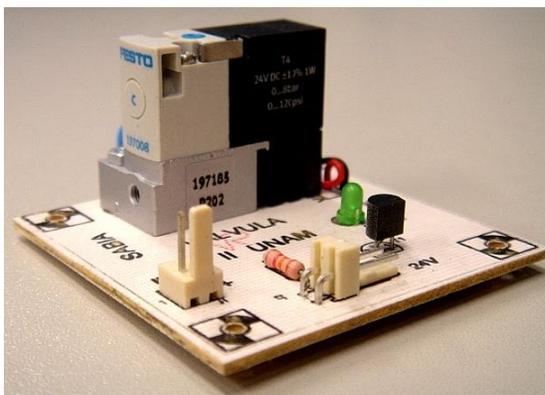


Figura 3.8 Tarjeta de adecuación para válvulas

3.4.5 Interconexiones para flujo de biogás

Las interconexiones para flujo de biogás mediante tubo flexible (manguera), hacen uso de conectores tipo racor rápido (**Figura 3.9**). Este tipo de conectores disminuye la posibilidad de fugas en la conexión, su diseño no requiere del uso de adhesivos y/o algún otro elemento para fijar la interconexión, lo que facilita la desconexión del tubo flexible para mantenimiento del equipo.



Figura 3.9 Conectores tipo racor rápido para tubo flexible

3.4.6 Tarjeta de adquisición de datos

La elección de la tarjeta de adquisición de datos (TAD) se llevó acabo principalmente por su disponibilidad (**Figura 3.10**). La tarjeta que utilizaba la versión anterior excedía los requerimientos del sistema. La TAD utilizada en esta nueva versión es de bajo costo, reducida en tamaño y se ajusta a las requerimientos del sistema. Sumado a estas características, utiliza el protocolo USB de comunicación, lo cual facilita su conexión, intercambio y además su disponibilidad si se requiere para otras aplicaciones, mientras el equipo SABiA no sea utilizado.



Figura 3.10 TAD USB-6008 de NI

3.4.7 Software LabVIEW 7.1

La disponibilidad del software LabVIEW 7.1, así como sus características, hizo que se tomara la elección de desarrollar el programa de aplicación en este software. Desde su creación en 1986, LabVIEW™ enfatizó su desarrollo en facilitar las tareas de adquisición de datos y aplicaciones de control para usuarios con conocimientos en la materia. Existen diversas formas de llevar a cabo éstas tareas, el software LabVIEW™ es sólo una de ellas. Las características principales de este software es que las aplicaciones se desarrollan de manera gráfica y que la interfaz a usuario simula la operación de instrumentos físicos. Tiene contenidas aplicaciones para facilitar las tareas de adquisición, análisis, visualización y archivado de datos, así como una amplia gama de herramientas prediseñadas para el desarrollo de código de programa.

Capítulo 4

4.1 Estructura general del equipo y disposición de componentes

En el capítulo anterior se cubrieron los fundamentos y razones del diseño del sistema automatizado, así como la elección de los componentes que lo integran, de manera individual. En el presente apartado, se hace una descripción detallada de la disposición de tales componentes en la estructura final del equipo. Posteriormente, y debido a que se trata de un sistema automatizado, esta descripción se profundiza y divide en dos vertientes principales: hardware y software.

Para realizar una prueba de biodegradabilidad anaerobia, es necesario utilizar equipo independiente del sistema, como se muestra en la **Figura 4.1a**. Para mantener los reactores a un nivel de temperatura controlado es necesaria una incubadora, y para favorecer el contacto entre el sustrato y la biomasa se utiliza un agitador orbital.



Figura 4.1a Equipo SABiA con equipo complementario

Estos elementos son importantes para realizar las pruebas de biodegradabilidad, pero no son considerados como parte del sistema diseñado. El sistema automatizado consta de tres elementos principales: reactores de prueba, gabinete y computadora que contiene el software de aplicación (**Figura 4.1b**), los cuales se describen en las secciones siguientes.



Figura 4.1b Elementos que integran al equipo SABiA

4.2 Hardware

4.2.1 Reactores

Los reactores de prueba son frascos graduados de vidrio de borosilicato con una capacidad de 250 mL, con rosca y tapa con rosca de la marca KAVALIER®. En la **figura 4.2** se muestran fotografías de ellos. Cada uno de ellos, en la parte superior de la tapa tiene dos olivas fabricadas sobre medida para ayudar a realizar la conexión de las mangueras que les unen al sistema. Los frascos utilizados como reactores son los

mismos que los del equipo anterior, sólo se añadió a cada uno un conector tipo racor rápido reductor (4-6 [mm]), puesto que los conectores pasamuro en el gabinete son de 4[mm] y el diámetro de la manguera de conexión a las olivas es de 6[mm].



Figura 4.2 Botellas utilizadas como reactores

4.2.2 Gabinete

Dentro del gabinete, se encuentran dispuestos los elementos que conforman la interfaz principal del sistema. El interior de gabinete está constituido por los siguientes elementos:

- 7 transductores de presión (Honeywell, modelo SX15GD2)
- 7 válvulas solenoides (Festo, modelo MHA1)
- 15 tarjetas de adecuación de señal (7 para transductor de presión, 1 para transductor de temperatura y 7 para válvulas)
- 1 tarjeta de adquisición de datos (NI modelo USB6008)
- 1 fuente de poder (12 V_{DC} y 24 V_{DC})

Para el montaje de tales elementos fue necesario diseñar una estructura metálica que permitiera fijarlos y asegurarlos cuando el gabinete sea transportado. El interior del gabinete consta de dos niveles, mostrados en la **Figura 4.3**, desmontables sucesivamente, con el fin de facilitar el mantenimiento del equipo. Cada nivel está constituido a su vez por los siguientes elementos:

- En el primer nivel (**Figura 4.4a**), se sitúa la fuente de poder que alimenta a los circuitos acondicionadores de señal y tres tarjetas con transductor de presión y tres tarjetas con válvulas.
- En el segundo nivel (**Figura 4.4b**) están situadas cuatro tarjetas con transductor de presión y cuatro tarjetas con válvulas, además de la tarjeta para adecuación de señal del transductor de temperatura.

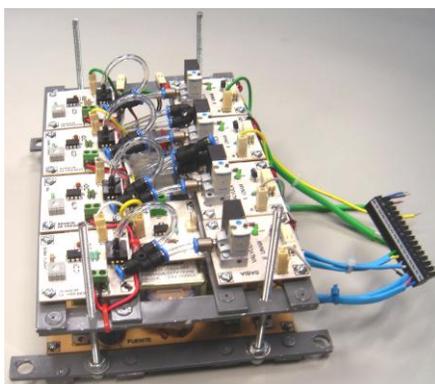


Figura 4.3 Estructura metálica de dos niveles

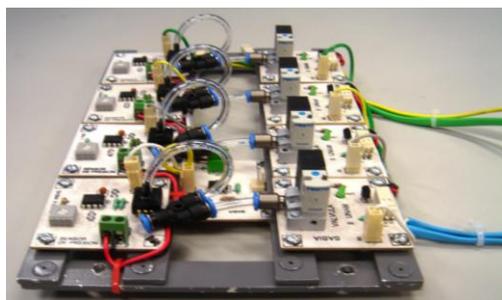


Figura 4.4a Nivel 1

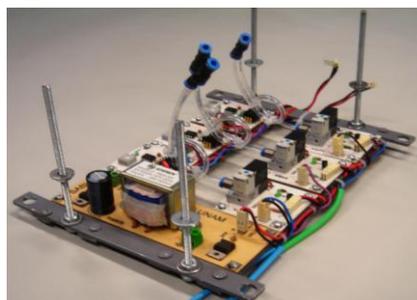


Figura 4.4b Nivel 2

La tarjeta de adquisición de datos se encuentra montada en un costado del gabinete. Su montaje permite la desconexión y utilización para otras aplicaciones en caso necesario. Las conexiones para flujo de biogás están constituidas por la conexión a cada transductor de presión, un conector a la válvula y unidas por un conector racor rápido tipo Y, el cual está conectado al pasamuro en el interior del gabinete. Las conexiones dentro del gabinete, así como de los conectores, son de 4mm de diámetro.

En el exterior del gabinete se encuentran otros elementos, dispuestos de la siguiente forma:

Frente: en la parte frontal del gabinete se encuentran distribuidas las conexiones para tubo flexible provenientes de los reactores, cada conexión está identificada mediante un número y constituida por un racor pasamuros. También, está montada una manija, útil para su transportación.

Costado derecho: consta de una placa desmontable, en la cual se sitúan el botón de encendido, un fusible, las conexiones para la alimentación desde la línea (127 V_{ac}), conexión para sonda de transductor de temperatura y la conexión a la computadora (**Figura 4.5**).



Figura 4.5 Exteriores del equipo SABiA

La sonda del transductor de temperatura está constituida por el transductor en un extremo y por su conector en el opuesto. El cable utilizado es especial para aplicaciones donde se requiere bajo nivel de ruido. Una fotografía se muestra en la **Figura 4.6**



Figura 4.6 Transductor de temperatura y cable de conexión

El diseño de hardware para las funciones electrónicas está constituido principalmente por la etapa de adecuación de señal de transductores y válvulas para la tarjeta de adquisición de datos NI USB6008. El diagrama de la **Figura 4.7** presenta el hardware para las funciones electrónicas del equipo SABiA. En la parte izquierda se encuentra la fuente de poder con sus valores nominales de voltaje para las tarjetas de adecuación de señal de válvulas y para las tarjetas de sensores de presión y temperatura. En la TAD se utilizan las 8 entradas analógicas y 7 de sus I/O digitales como salida. La conexión con la PC se realiza mediante comunicación USB.

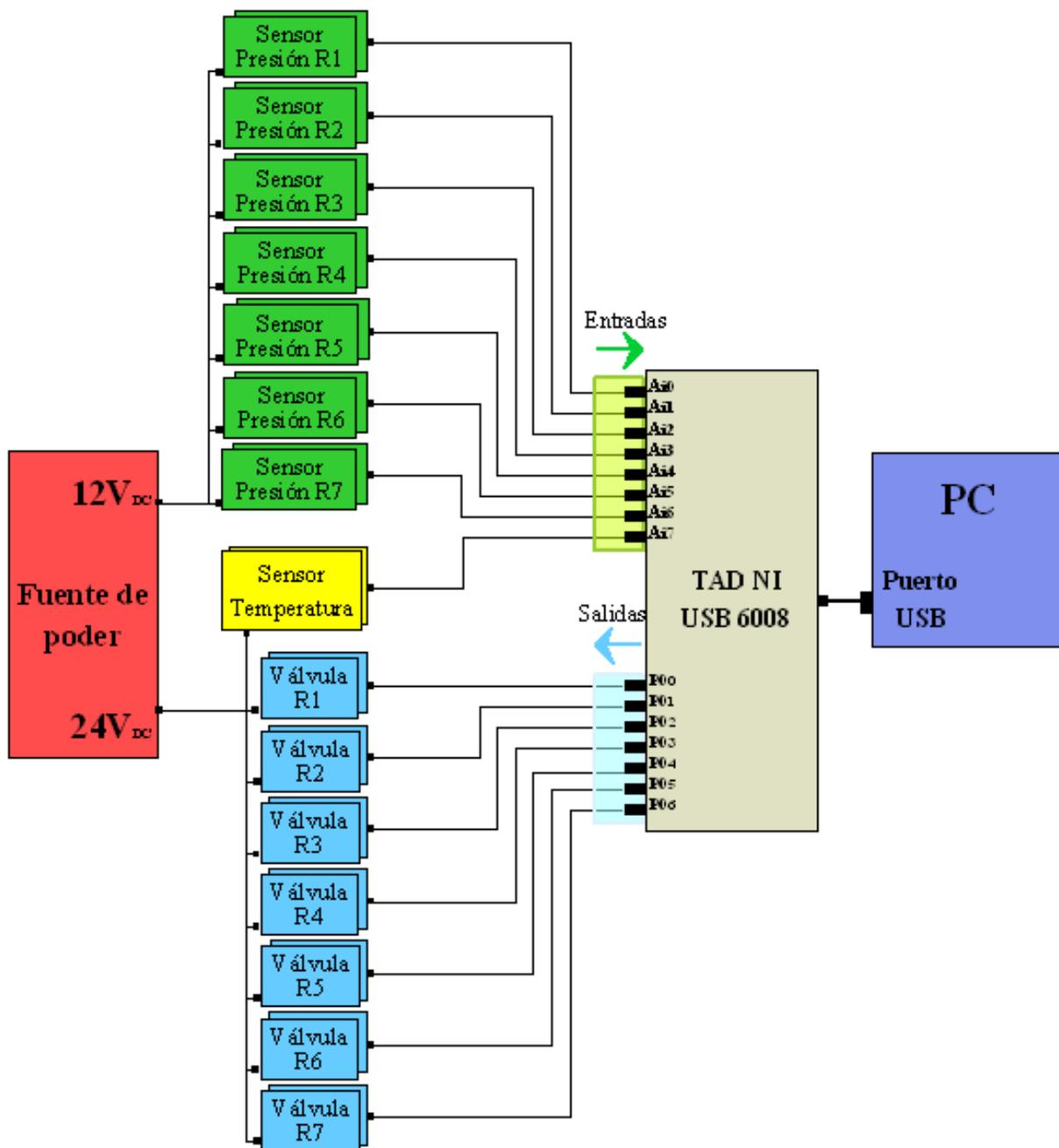


Figura 4.7 Diagrama general eléctrico del equipo SABiA

A continuación se describen de manera detallada cada uno de los circuitos implementados.

Fuente de poder

La fuente de poder (**Figura 4.8**) contiene dos fuentes. Una de 12 V_{DC} para alimentar los circuitos que contienen transductores de presión y temperatura, y otra de 24 V_{DC} para alimentar a los circuitos de válvulas solenoides.

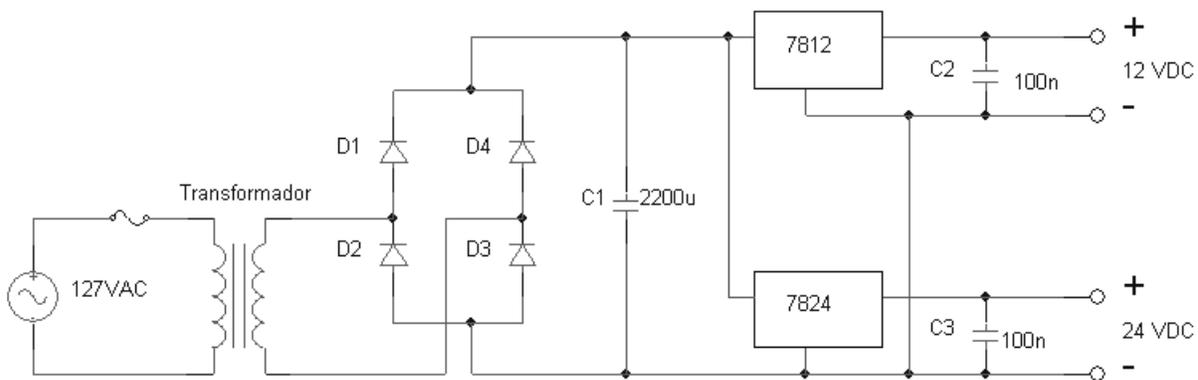


Figura 4.8 Circuito de fuente de poder

Tarjeta de adecuación de señal para transductor de presión

El circuito implementado (**Figura 4.9**) para la adecuación de señal del transductor de presión (Honeywell SX15GD2) consta de dos etapas de amplificación, las cuales se describen a continuación.

En la primera etapa, a la señal proveniente del transductor de presión representado por el arreglo de resistencias tipo puente, se le elimina el offset mediante un circuito diferenciador y se le aplica un filtro pasobajas analógico. Debido a la variación de los valores de offset de la señal de salida, fue necesario utilizar una resistencia variable, con el fin de ajustar al mínimo el offset de la señal resultante. Una vez que se ha

ajustado el offset al mínimo y se ha filtrado la señal, se amplifica mediante una segunda etapa de amplificación.

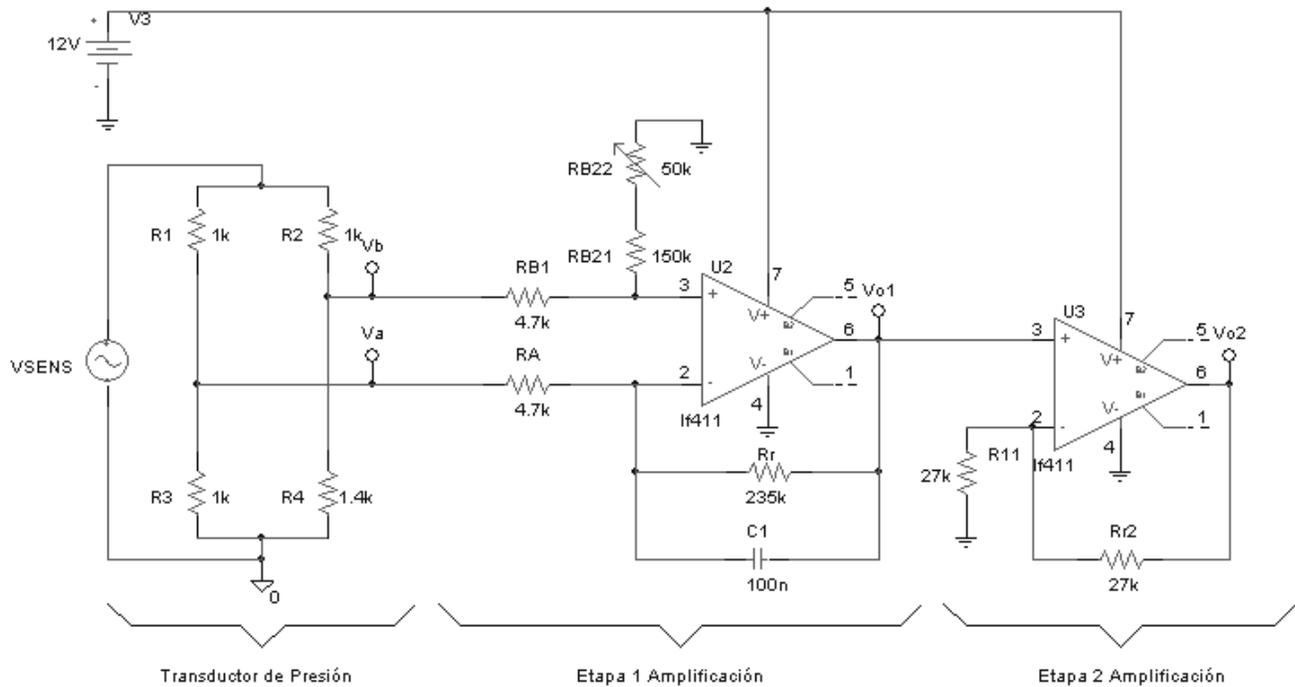


Figura 4.9 Circuito de amplificación multietapa para transductor de presión

Tarjeta de adecuación de señal para transductor de temperatura.

El circuito implementado para adecuar la señal proveniente del transductor de temperatura está constituido por la etapa de amplificación mostrada en la **Figura 4.10**. El filtrado de la señal se efectúa mediante software como se explicará posteriormente.

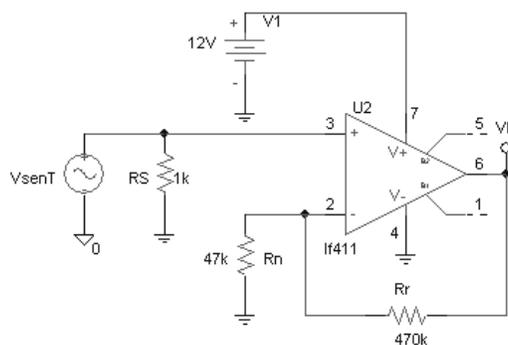


Figura 4.10 Circuito amplificador para transductor de temperatura

Tarjeta de adecuación para válvulas solenoides

A diferencia de las tarjetas de adecuación anteriores, ésta tarjeta (**Figura 4.11**) es alimentada con 24 V_{DC}. La señal digital proveniente de la NI-USB6008 es de tipo TTL, la cual es amplificada mediante un switch electrónico constituido por un transistor.

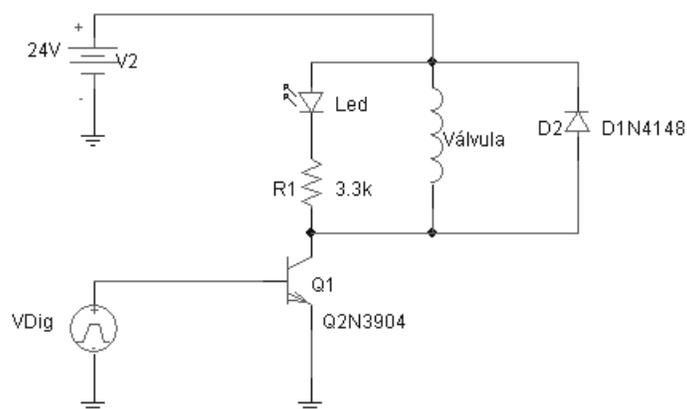


Figura 4.11 Circuito amplificador para activación de válvulas.

Cada uno de los circuitos diseñados fue simulado en PSpice y sometido a pruebas. Las características eléctricas de los circuitos acondicionadores fueron calculadas para obtener la máxima resolución en la tarjeta de adquisición de datos, cumpliendo con las especificaciones eléctricas dadas por el fabricante de ésta.

Tarjeta de adquisición de datos

La configuración de la tarjeta NI USB6008 se realiza mediante software, utilizando la herramienta DAQmx. Las conexiones para la tarjeta de adquisición de señales NIUSB6008 se detallan en la **Tabla 4.1**, y son las siguientes:

Conexiones NI USB6008		
Puerto	Canal	Conexión de elemento
Puerto analógico de entrada Ai†	Ai ₀	Sensor de presión R1
	Ai ₁	Sensor de presión R2
	Ai ₂	Sensor de presión R3
	Ai ₃	Sensor de presión R4
	Ai ₄	Sensor de presión R5
	Ai ₅	Sensor de presión R6
	Ai ₆	Sensor de presión R7
	Ai ₇	Sensor de temperatura
Puerto digital P0*	P0. ₀	Válvula R1
	P0. ₁	Válvula R2
	P0. ₂	Válvula R3
	P0. ₃	Válvula R4
	P0. ₄	Válvula R5
	P0. ₅	Válvula R6
	P0. ₆	Válvula R7

Tabla 4.1 Conexiones para NI USB6008

† Configuración en modo común

* Configuración tipo push-pull de salida

4.3 Software

4.3.1 Introducción

La programación en LabVIEW se desarrolla en dos ventanas principales, que corresponde a un diagrama a bloques y un panel de interfaz a usuario.

En el panel de interfaz a usuario, como su nombre lo indica, el usuario interactúa de manera visual o activa con el desarrollo de la ejecución del programa. La ambientación gráfica simula carátulas o paneles de instrumentos físicos. Las herramientas prediseñadas contienen elementos como gráficas, botones, perillas, tablas, palancas, recuadros de texto y barras de colores, principalmente. Estos pueden tomar la función de indicadores para desplegar información, o bien la función de controles para cambiar parámetros en la ejecución del programa. Ambos grupos tienen la posibilidad de ser modificados operativamente, así como en su aspecto. Al situar algún elemento en el panel, se crea automáticamente una terminal en el diagrama a bloques para su manipulación.

El diagrama a bloques, transparente al usuario, contiene el código del programa. Es en esta ventana donde se desarrolla el programa en sí. Al igual que en el panel de interfaz a usuario, se dispone de una variedad de herramientas prediseñadas; algunas tienen una función similar a las instrucciones de lenguajes de programación comunes. Estructuras tipo *while*, *for*, *if-then*, *else*, *switch-case-otherwise*; instrucciones de tipo aritmético, booleano, de arreglo de datos, de almacenamiento de archivos y de comunicación con otros dispositivos, principalmente. Se puede definir una gran variedad de tipos y formatos de datos dependiendo de las necesidades requeridas en la aplicación.

Al desarrollar una aplicación en LabView, es recomendable diseñar primero el panel de interfaz a usuario, para posteriormente realizar el código de programa. Cada VI (virtual instrument) creado contiene la ventana de código y la de panel. Configurando las propiedades de estos, se pueden crear “subVI’s” los cuales realizan la función de subrutinas dentro del programa principal.

4.3.2 Programación en LabVIEW

Para el desarrollo del programa de automatización se utilizó LabVIEW versión 7.1 profesional. La metodología seguida fue de tipo top-down, en la cual se definen y realizan primero las tareas de la aplicación a grandes rasgos en un diagrama a bloques, para luego desarrollarlos junto con sus detalles; las cuales están integradas por los requerimientos planteados del sistema en hardware, el procesamiento de datos, las acciones de control en el sistema y la interacción del usuario en el uso del programa.

4.3.2.1 Bloques del programa de aplicación

Básicamente el programa contiene las tareas de: adquisición de datos, procesamiento, análisis, archivado y visualización de éstos, y acciones de control en el sistema. El programa está estructurado como se indica mediante el siguiente diagrama a bloques simplificado (**Figura 4.12**):

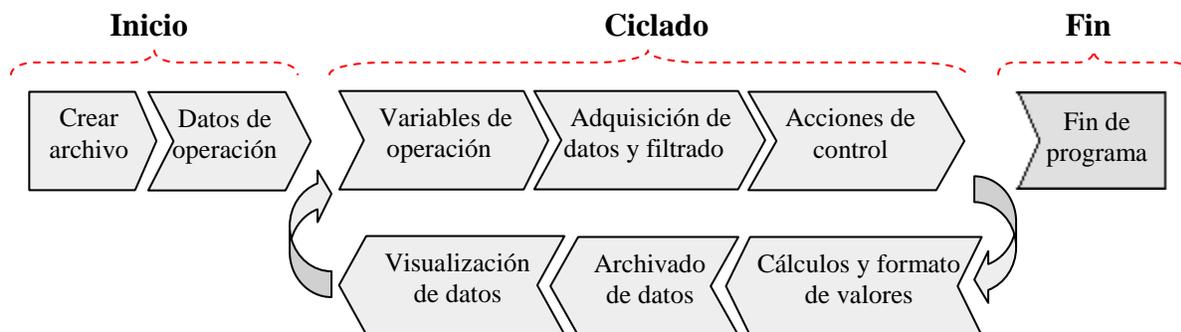


Figura 4.12 Diagrama de bloques principales de programa

A continuación se describen las características de los bloques del programa de manera funcional.

Inicio de programa

Crear archivo

Debido a los requerimientos del sistema, es necesario crear reportes para su posterior análisis. El primer bloque en la ejecución del programa se encarga de crear un archivo de respaldo donde se irán reportando las lecturas de presión, así como la información añadida. El usuario crea el archivo pero sólo se guarda la ruta con el nombre especificado, al final de la ejecución de programa se copia el archivo de respaldo con el nombre dado a la ruta elegida por el usuario. Este obtendrá un formato de hoja de cálculo que puede ser leído y procesado por programas como Microsoft Excel o Calc de OpenOffice. La razón del tipo de archivo que se crea es debido a la popularidad que tienen este tipo de aplicaciones para poder realizar tareas de manipulación de datos.

Datos de operación

Para poner en ejecución el programa es necesario que el usuario defina algunos datos previamente, como los correspondientes a los volúmenes de los elementos de los sistemas, y la duración en tiempo de la prueba. Estos datos de operación no pueden ser modificados una vez que el programa ha entrado a la etapa de ciclado; puesto que los primeros son fundamentales para los cálculos de producción de biogás y los restantes para las condiciones de paro de programa.

Ciclado de programa

Los siguientes bloques conforman el ciclado del programa y se ejecutan de forma similar a una maquina de estados. Este ciclo sólo es terminado cuando alguna de las condiciones de paro de programa se da, terminando con la ejecución del ciclo y ejecutando la última parte del programa.

Variables de operación

Las variables que conforman este bloque son: las condiciones de paro del programa y la actualización de: temporizadores, periodo de registro de lectura, valor máximo de presión permitido y el tiempo de paro por estabilidad. Es en este bloque donde se actualizan los valores disponibles al usuario durante la ejecución del programa y los valores del panel principal.

Adquisición de datos y filtrado

Realiza la tarea de adquisición de datos de cada uno de los 8 canales analógicos de entrada, correspondientes a los transductores de presión y temperatura. También se realiza el filtrado de los datos de cada canal para eliminar el ruido. Primero se aplica un filtro pasobajas digital y posteriormente se calcula la media de una ventana de 100 ms de los valores filtrados, correspondiente a 100 datos. De esta manera se obtienen las medias de los valores correspondientes a cada canal.

Acciones de control

Realiza el control tipo ON-OFF de presión máxima permitida en cada reactor y se inician y actualizan los valores de los temporizadores de paro de programa por estabilidad en las lecturas de presión leídas.

Los siguientes bloques se realizan sólo cuando el periodo de registro se haya cumplido.

Cálculo y formato de datos

Se calcula el número de moles correspondiente al tipo de prueba, con los porcentajes dados por el usuario, mediante la ecuación de gases ideales. Además de efectuar la conversión de los valores registrados y calculados a variables tipo texto, con el formato requerido, se actualiza la ventana de registros en forma tabular.

Archivado de datos

Una vez obtenido el formato de los valores a registrar, éstos se guardan en un archivo de respaldo, evitando de esta forma problemas de acceso mientras el programa está en ejecución.

Visualización de datos

Los valores de presión registrados se despliegan gráficamente en una ventana, donde se grafica presión contra tiempo, de cada uno de los reactores seleccionados.

Fin de programa

Una vez concluido el ciclo principal de programa se crea el archivo con la ruta y nombre especificados por el usuario, copiando el archivo de respaldo.

4.3.2.2 Diagrama de flujo SABiA

El diagrama de flujo que se presenta a continuación, describe de manera explícita el orden de las operaciones en la estructura general del programa y se basa en los tres bloques principales del diagrama a bloques antes descrito.

INICIO

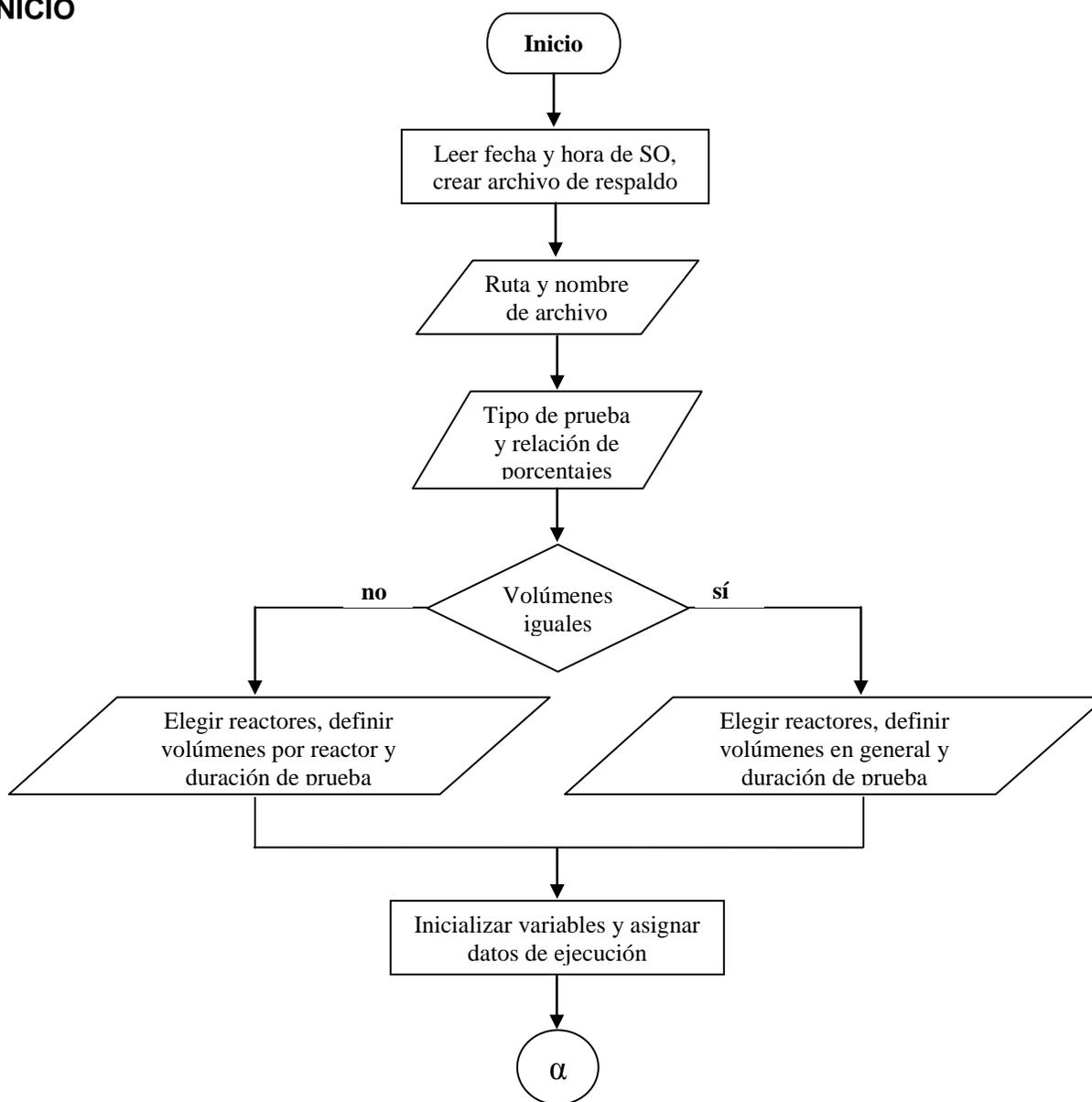


Figura 4.13a Diagrama de flujo, bloque de inicio de programa

Ciclado de programa

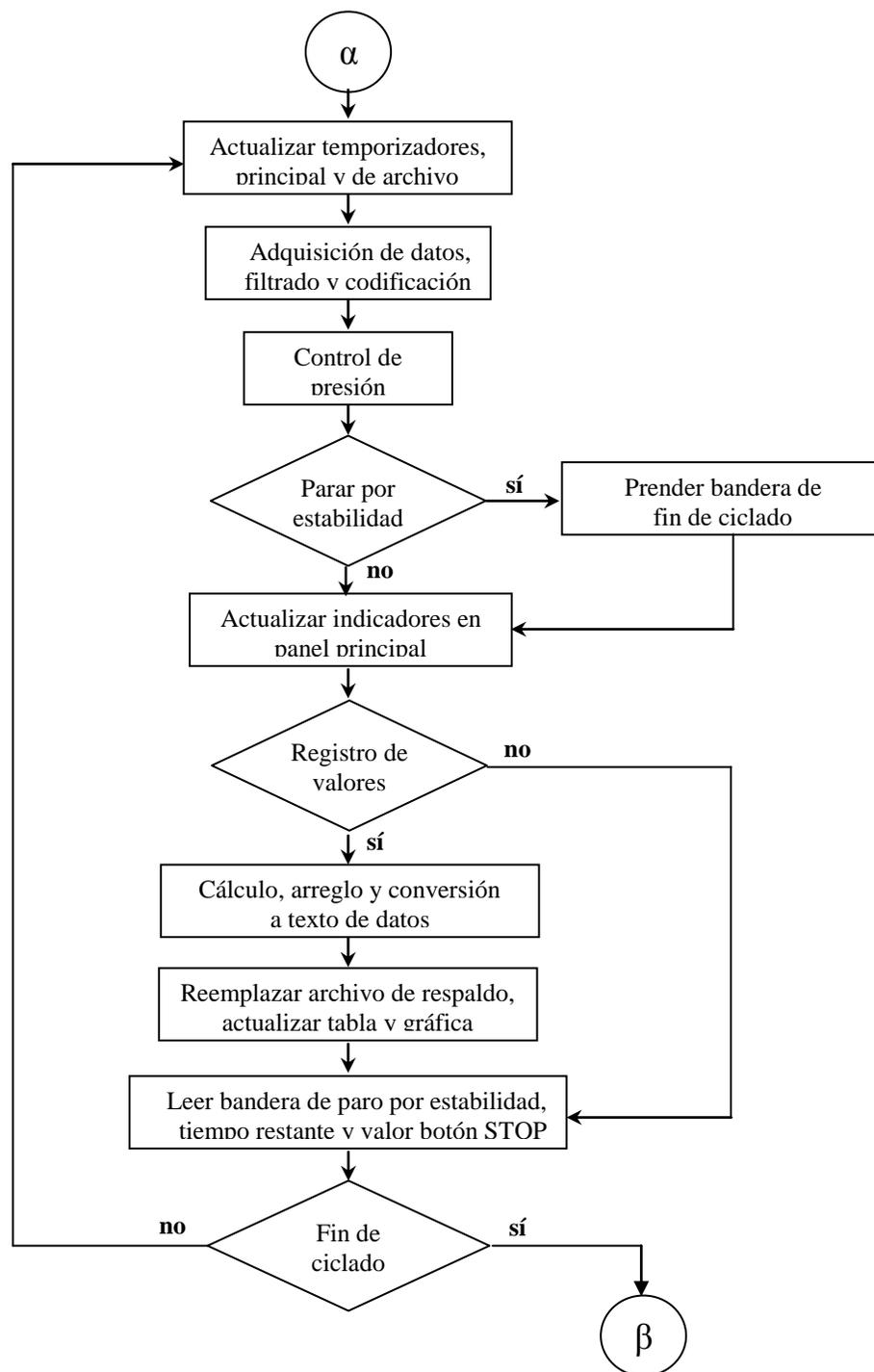


Figura 4.13b Diagrama de flujo, bloque de ciclado de programa

Fin de programa

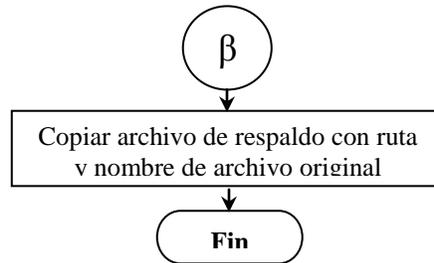


Figura 4.13c Diagrama flujo, bloque de fin de programa

Control de presión

El algoritmo implementado, mediante el cual se realiza el control de presión, se especifica mediante el siguiente diagrama de flujo.

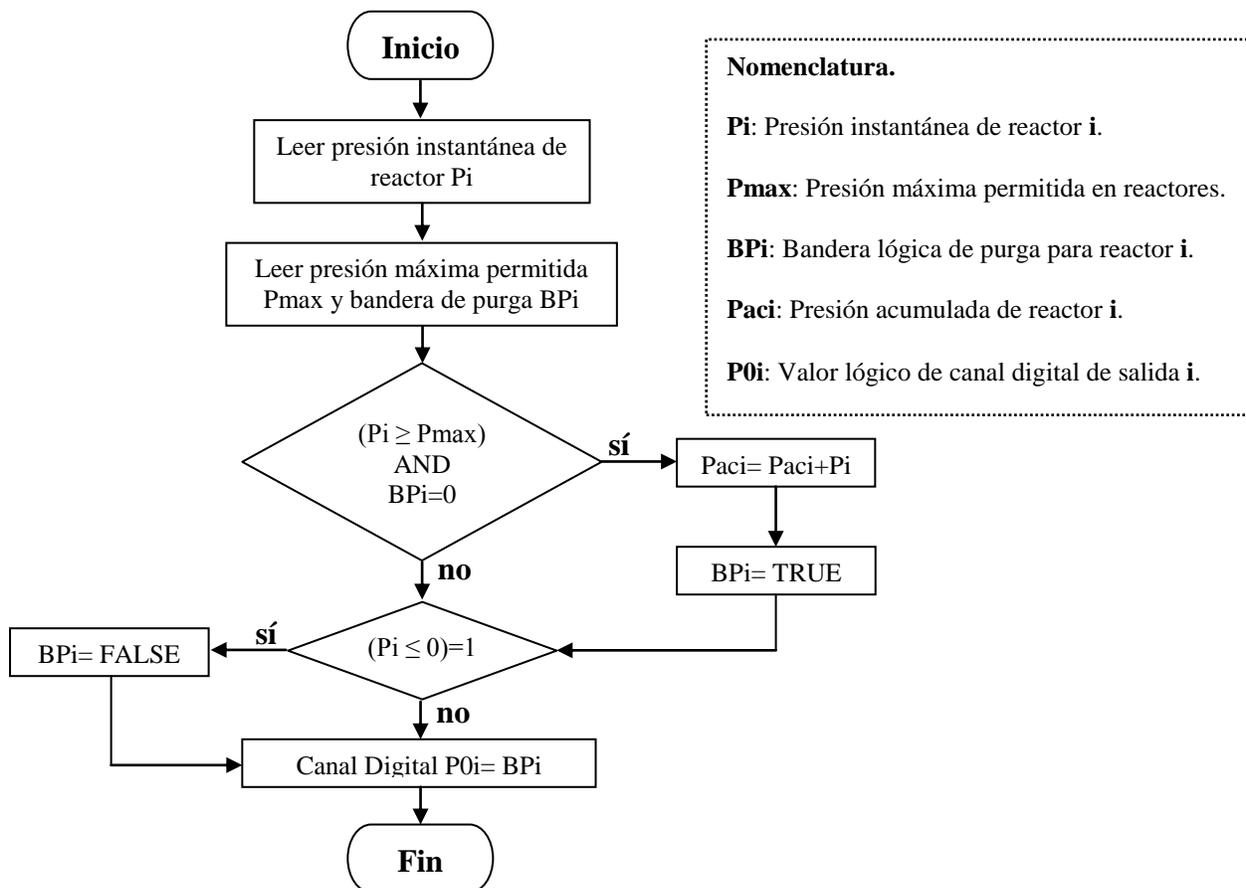
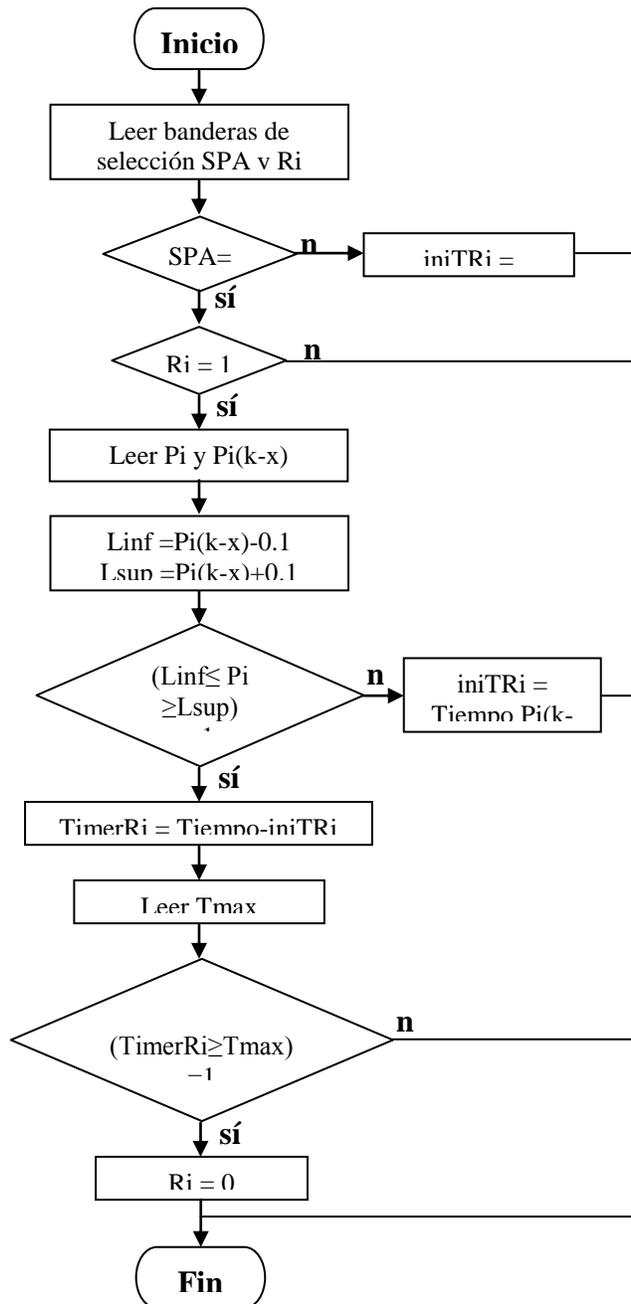


Figura 4.14 Diagrama de flujo, subrutina de control de presión

Paro automático por estabilidad



Nomenclatura

- iniTRi:** Inicio de temporizador de reactor *i*.
- Linf:** Límite inferior para condiciones de estabilidad.
- Lsup:** Límite superior para condiciones de estabilidad.
- Pi:** Presión instantánea de reactor *i*.
- Pi(k-x):** Valor anterior de lectura de presión en instante k-x de reactor *i* para condiciones de estabilidad.
- Ri:** Bandera lógica de selección de reactor *i*.
- SPA:** Bandera lógica de selección de paro automático.
- Tiempo:** Tiempo transcurrido desde el inicio de prueba.
- Tmax:** Tiempo máximo permisible en condiciones de estabilidad
- TimerRi:** Valor de temporizador para reactor *i* en condiciones de estabilidad.

Figura 4.15 Diagrama de flujo de subrutina de paro automático por estabilidad

4.3.2.3 Código del programa

El código del programa consta de múltiples subrutinas (subVI's). Debido a que en LabVIEW se programa de manera gráfica, algunos aspectos de la programación son difíciles de reportar, pues el código queda en múltiples planos. Es por ello que el código que se presenta a continuación sólo presenta los aspectos más importantes y/o relevantes del programa.

Siguiendo con la nomenclatura utilizada en el diagrama a bloques simplificado, se muestra a continuación el código correspondiente. El programa está estructurado dentro de una secuencia, descrita de forma gráfica en el diagrama a bloques simplificado.

Inicio

Crear archivo

En esta parte del código del programa (**Figura 4.16**), se presenta al usuario la ventana correspondiente para crear el archivo y se asignan los valores de fecha y hora de inicio de la prueba.

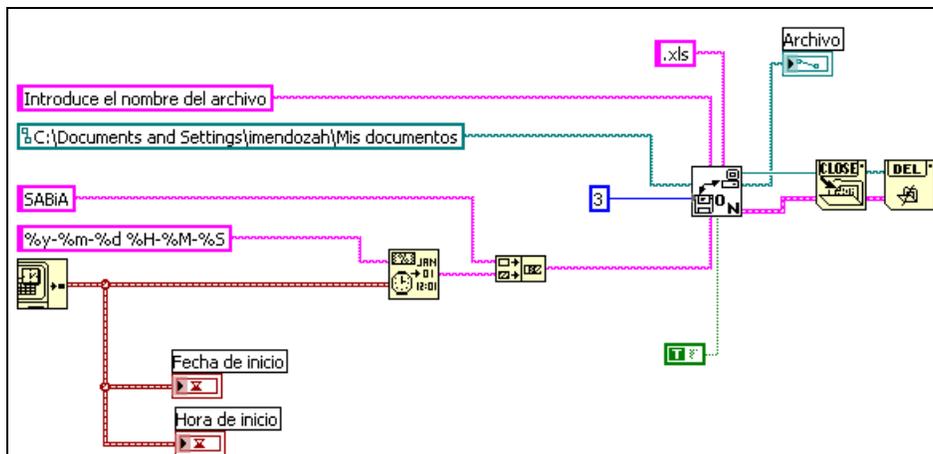


Figura 4.16 Código para creación de archivo

Datos de operación

En este bloque de programa (**Figura 4.17**), se presentan al usuario las ventanas correspondientes para introducir los datos de operación: elección de sistemas a usar, volúmenes, porcentaje teórico asignado a cada sustancia, tipo de prueba y duración de prueba, se inicializan variables de tiempo y arreglos y se asignan valores de los datos de ejecución a variables; consta de 3 subVI's los cuales contienen a las ventanas donde se introducen los datos.

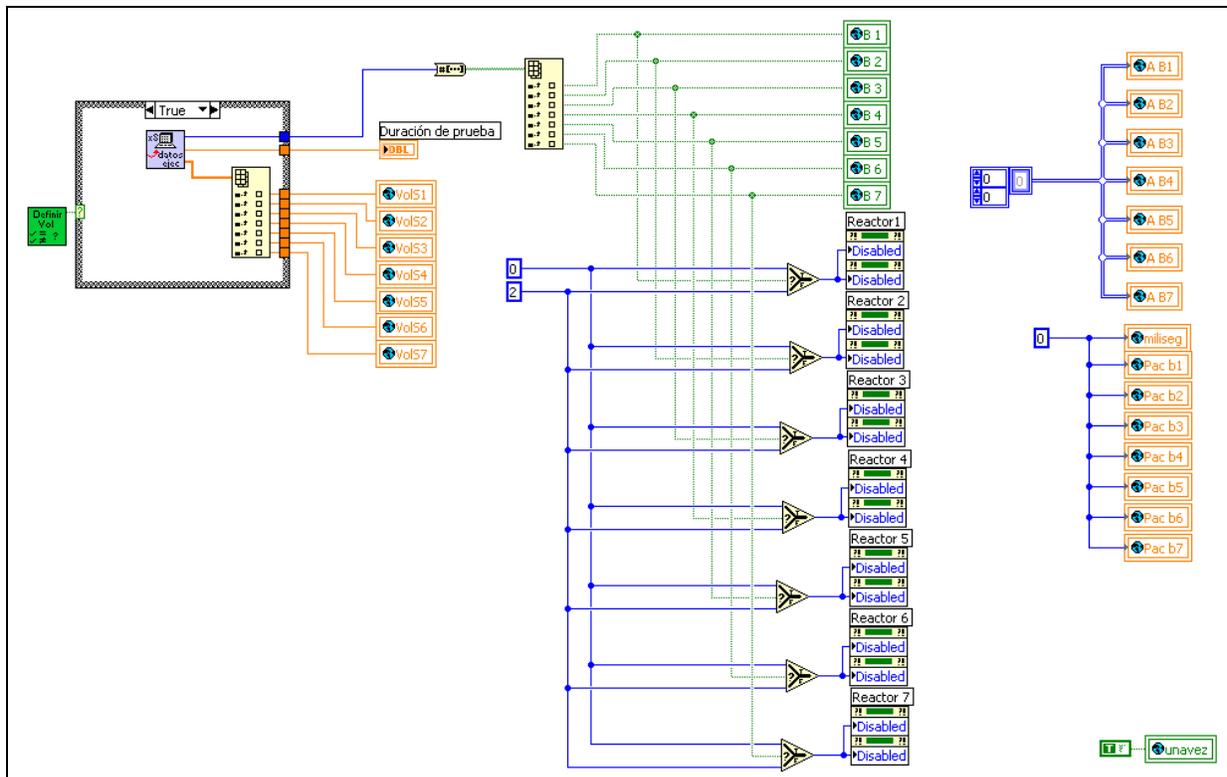


Figura 4.17 Código para introducir datos de operación

Ciclado de programa

Esta parte (**Figura 4.18**) se ejecuta igual que una estructura tipo while y contiene múltiples subVI's que realizan las tareas de temporizado, filtrado, control, arreglo y conversión de valores registrados y despliegue de información al usuario. El ciclo se termina cuando alguna de las condiciones de paro se de. Dentro del ciclo, los bloques se ejecutan secuencialmente. La primera parte de la secuencia está constituida por la adquisición de datos y el filtrado; la segunda parte por las acciones de control y la actualización de variables del panel principal; finalmente, la tercera parte de la secuencia se ejecuta sólo cuando el tiempo de registro se haya cumplido y consta de las acciones de archivado de datos y despliegue de información en forma tabular y gráfica.

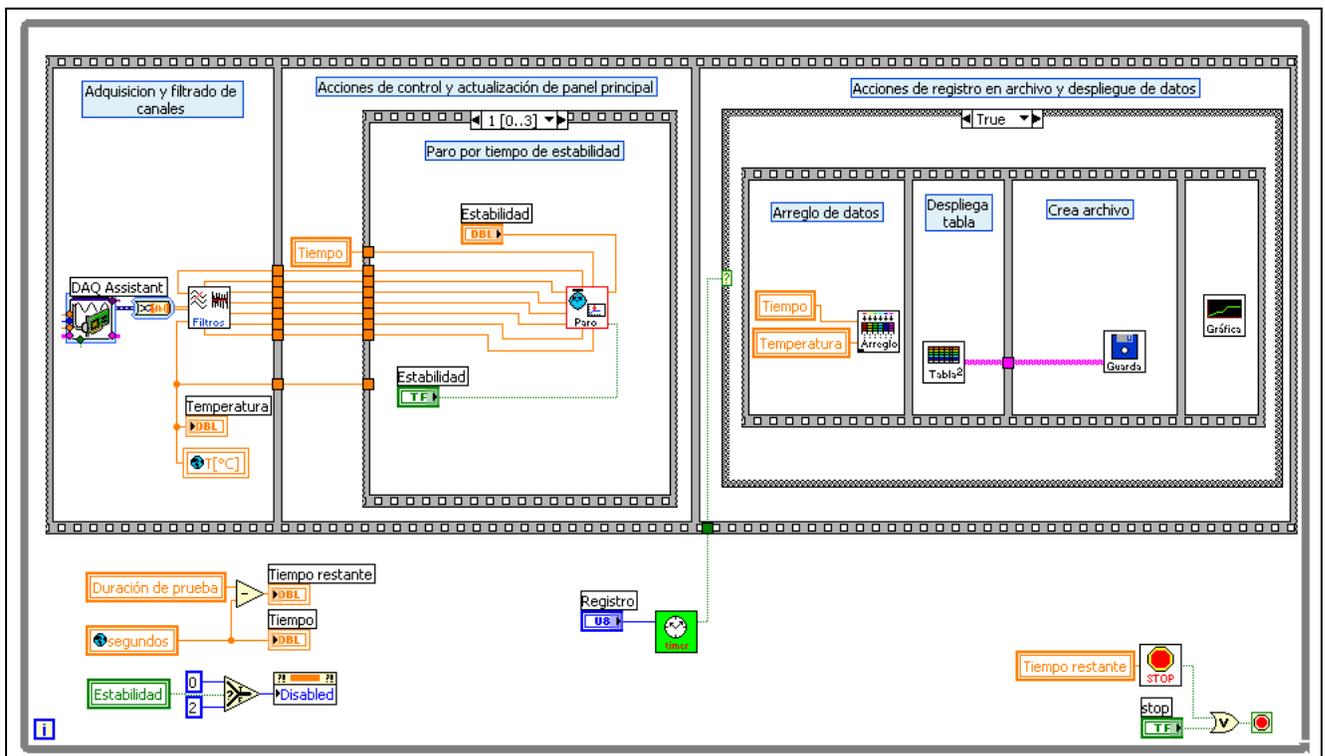


Figura 4.18 Código de ciclado de programa

Filtrado digital y parametrización de señales

La adquisición de señal de cada uno de los 8 canales analógicos se realiza a una tasa de muestreo de 1 [kHz], tomando 100 muestras de cada canal. Posteriormente se calcula la media aritmética de los valores filtrados. Para la implementación del filtrado digital se utilizó un filtro pasobajas tipo Butterworth de orden 2, con una frecuencia de corte de 10 [Hz]. Posteriormente se realiza la adecuación del valor filtrado en volts a su correspondiente valor de presión en psi. Es en este subVI donde se realiza la calibración de cada uno de los transductores utilizados (**Figura 4.16**).

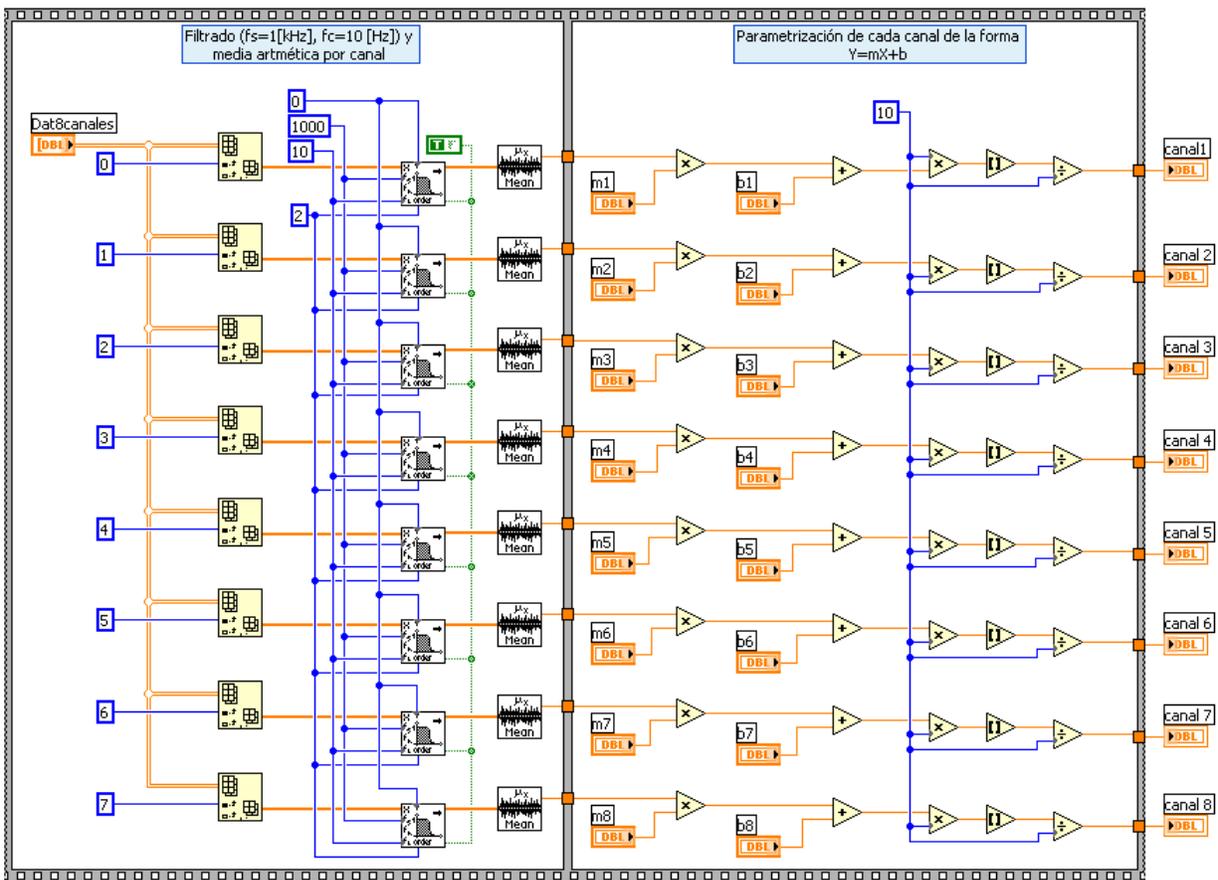


Figura 4.19 Código de filtrado digital y parametrización de canales

Control de presión

Una vez obtenido el valor de presión instantáneo en psi de cada uno de los reactores, se efectúa el control de presión (**Figura 4.20**).

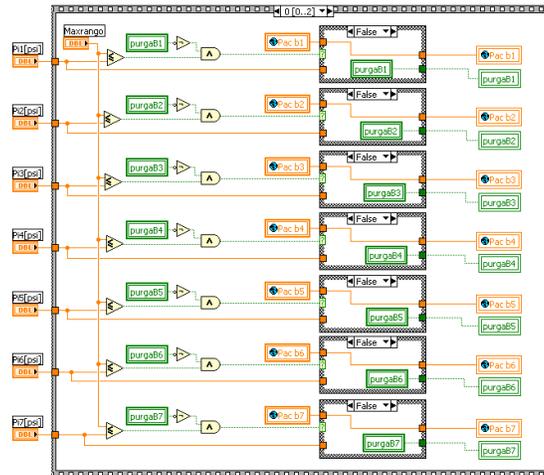


Figura 4.20 Código de módulo de control de presión en reactores

Paro por estabilidad

Esta parte de código (**Figura 4.21**) sólo se efectúa si el botón de paro automático por estabilidad está habilitado.

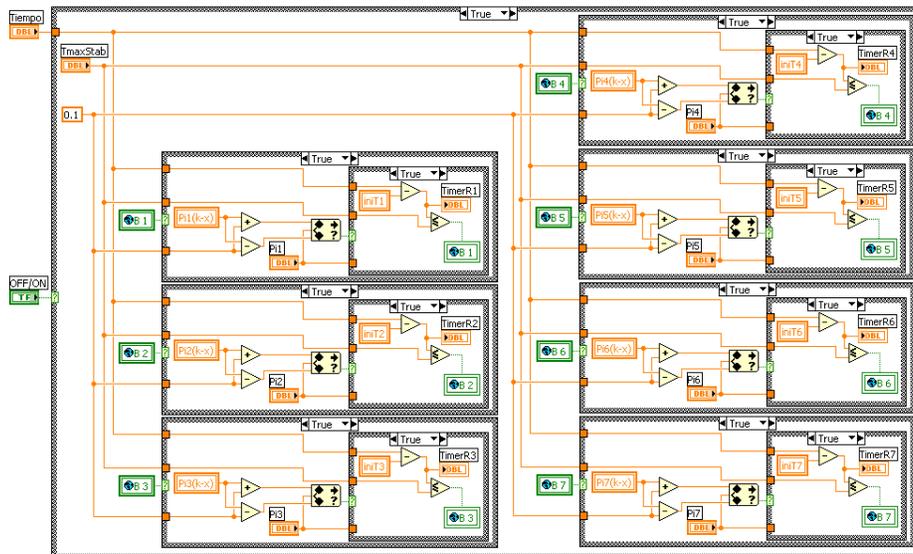


Figura 4.21 Código de paro automático por estabilidad

El principio que se sigue para terminar con el registro de datos de un reactor dado por paro por estabilidad es de tipo *ventana*. Cada reactor tiene un temporizador asignado, el cual se incrementa desde que se dan las condiciones de estabilidad. Este temporizador (TimerRi) es comparado con el valor de tiempo máximo de estabilidad (Tmax) asignado por el usuario en el momento en que se ejecuta el algoritmo. Con fines explicativos, se muestra en la **Figura 4.22** una curva de degradación de un reactor a prueba y el resultado del algoritmo implementado. Suponiendo que el tiempo máximo de estabilidad (Tmax) es de 2 días y que el control por paro automático es seleccionado desde el inicio de la prueba, el resultado del algoritmo implementado es:

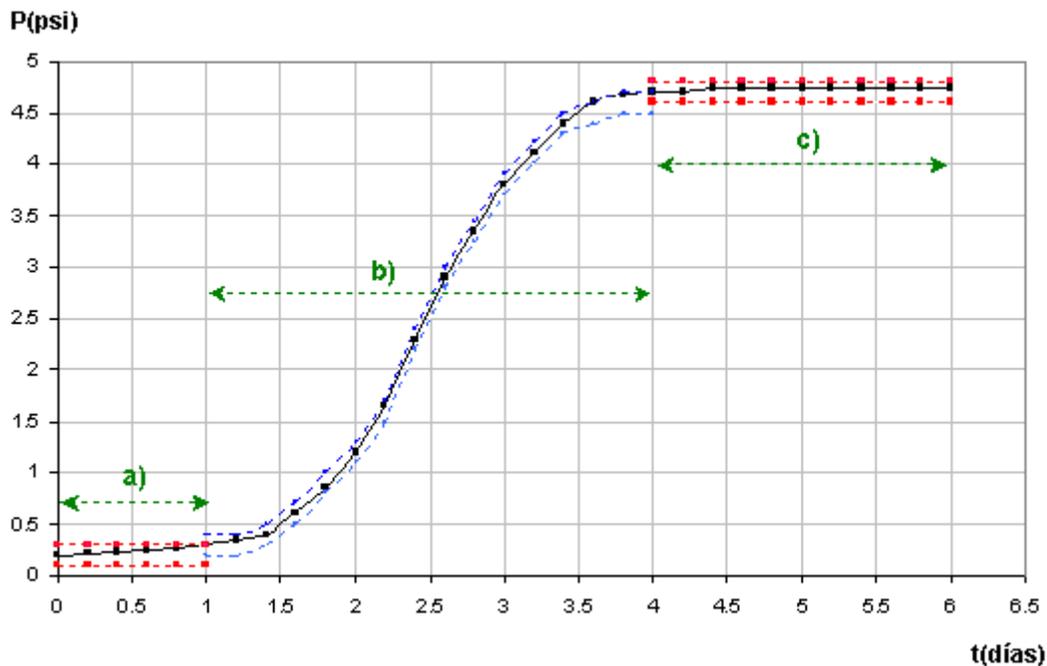


Figura 4.22 Principio de paro automático por estabilidad en un reactor

a) Etapa de latencia

Las condiciones de estabilidad son: $P_i(k-x)=0.2[\text{psi}]$, $L_{\text{inf}}=0.1[\text{psi}]$, $L_{\text{sup}}=0.3[\text{psi}]$.

Las condiciones de paro por estabilidad se dan durante este periodo (TimerRi=1[día]); pero no se llega al valor en tiempo para dejar de registrar los

datos del reactor. Puesto que **NO** se cumple $\text{TimerRi} \geq T_{\text{max}}$ debido a que se rebasa el límite superior en el día 1.

b) Etapa de degradación

Durante el desarrollo de esta etapa los valores de $P_i(k-x)$, L_{inf} y L_{sup} , son “dinámicos” y cambian cada que se rebasan los límites establecidos. Por lo anterior, el temporizador del reactor (TimerRi) es reiniciado cada vez que cambia el valor de $P_i(k-x)$.

c) Etapa de estabilidad

Las condiciones de paro se dan con los siguientes valores: $P_i(k-x)=4.7[\text{psi}]$, $L_{\text{inf}}=4.6[\text{psi}]$, $L_{\text{sup}}=4.8[\text{psi}]$. El temporizador del reactor comienza a contar desde el día 4 y se sigue incrementando hasta que se cumple la condición $T_{\text{max}} \geq \text{TimerRi}$. Es entonces cuando la bandera lógica de apagado se hace $R_i=0$, finalizando con el registro de datos de este reactor.

Cálculo de producción de biogás en mmol

Una vez cumplido el periodo de registro en archivo, el valor de la presión acumulada de cada reactor a prueba es utilizado para calcular la producción en moles de cada sustancia utilizando la ecuación de gases ideales (**Figura 4.23**).

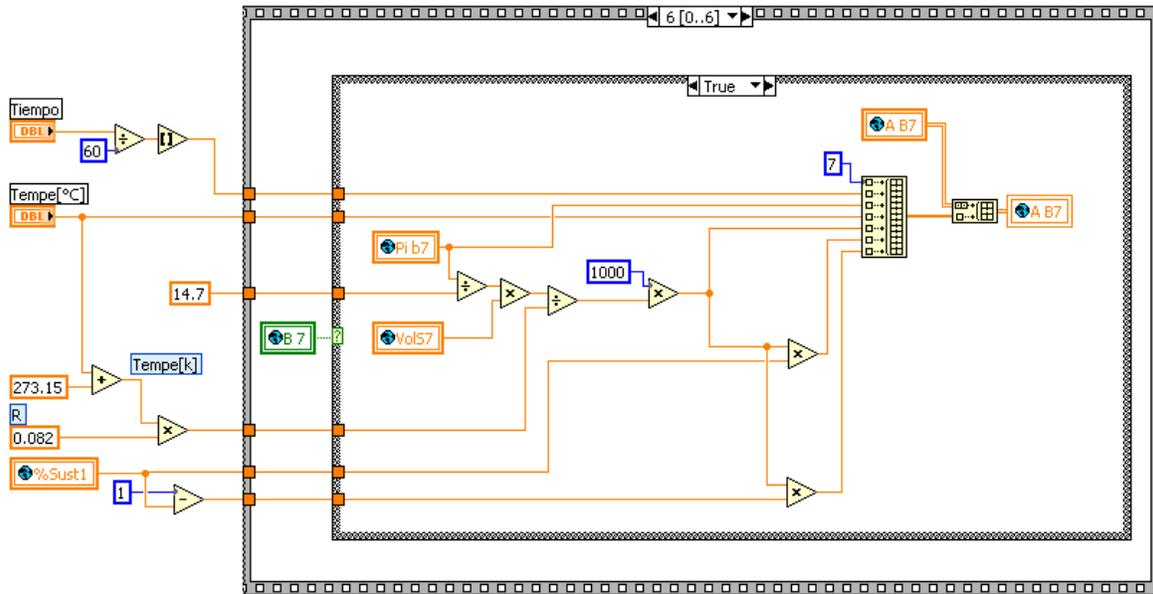


Figura 4.23 Código para cálculo de biogás y porcentajes, utilizando la ecuación de gases ideales

Fin de programa

Una vez concluida la etapa de ciclado, se realiza una copia del archivo de respaldo con la ruta y nombre especificados por el usuario, dando por terminada la ejecución del programa de manera total.

4.3.2.4 Ventanas de programa

Siguiendo con la descripción del programa de aplicación, y con referencia al diagrama a bloques simplificado (**Figura 4.12**), se describen a continuación las ventanas de programa disponibles al usuario.

*Crear archivo**

En esta ventana, primera en el flujo de programa, el usuario “crea” el archivo. El cual tiene un nombre tentativo de la forma “SABiA aa-mm-dd hh-mm-ss “, lo que corresponde a: año-mes-día hora-minutos-segundos con el encabezado SABiA.

*Datos de operación**

Para introducir los datos de operación, al usuario se le presentan dos ventanas. En la primera se elige la manera de introducir los datos de volúmenes, el tipo de prueba a realizar y los porcentajes de las sustancias correspondientes.

En la segunda, se definen los volúmenes y la duración de la prueba, esta ventana es dependiente de la elección del usuario. Si son diferentes, la ventana que se presenta contiene la elección de cada reactor con sus correspondientes volúmenes (reactor, manguera y líquido); si son iguales entonces la ventana que se muestra contiene la elección de los sistemas y la definición de volúmenes de manera general.

***Estas ventanas se reportan en el apéndice A**

Ventanas principales

Una vez introducidos los datos de operación, el programa presenta tres ventanas: el panel de control, la tabla de valores y una gráfica. Cada una de estas ventanas se muestra de forma independiente, con el fin de obtener una mejor visualización de los campos de interés para el usuario.

Panel de control

En el panel de control mostrado en la **Figura 4.24**, el usuario configura mediante botones virtuales el periodo de registro, los valores de máxima presión permitida; la elección de fin de prueba por tiempo de estabilidad y su respectivo valor en tiempo; así como poder finalizar el programa de manera manual. Los indicadores digitales y gráficos muestran de manera dinámica los reactores activos y su respectivo valor de presión, el valor de temperatura; y datos generales que son: la fecha y hora de inicio de la prueba, la duración de la prueba, el tiempo restante y transcurrido y, finalmente la ubicación y nombre del archivo.

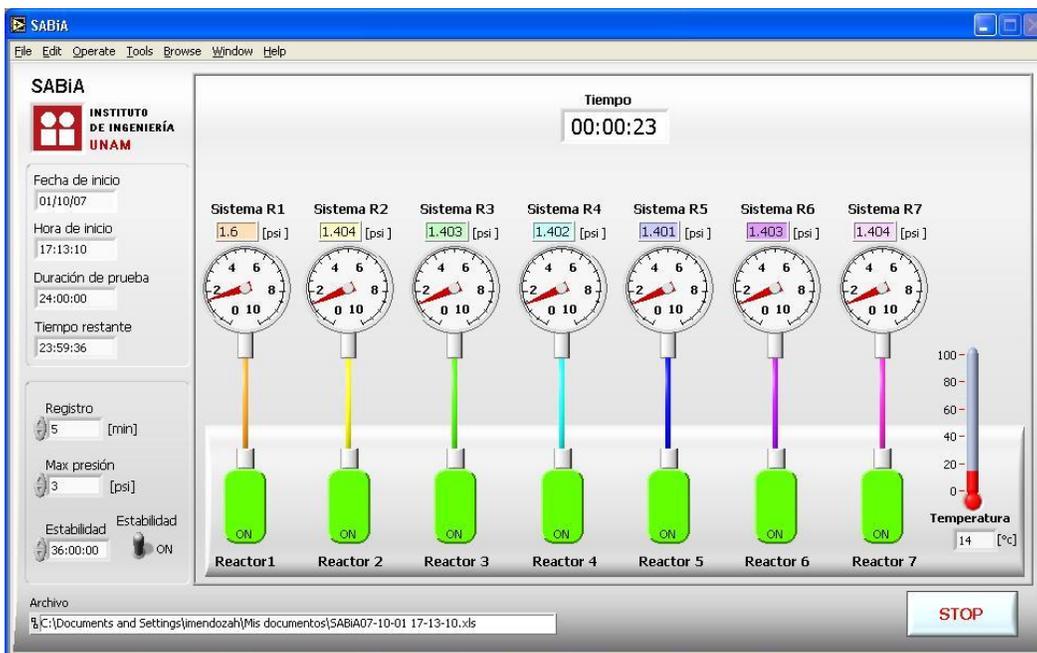


Figura 4.24 Panel de control

Tabla de valores

En esta ventana, **Figura 4.25**, se muestra al usuario los valores de presión registrados de cada uno de los reactores elegidos y/o activos, el tiempo transcurrido al momento de registrar el valor de presión, el porcentaje de biogás y porcentaje de sustancias. Este formato tabular, así como sus valores, son los mismos que se reportan en el archivo. Las lecturas correspondientes a cada reactor están distinguidas por colores, cada fila de valores tiene el fondo iluminado con un color que varía dependiendo del número de reactor.

#Reactor	Tiempo[min]	P. inst. [psi]	Pres. [psi]	Temp.[°c]	Biogas[mmol]	H2[mmol]
4	1530.000	0.020	4.610	27.970	2.424	1.455
4	1540.000	0.020	4.610	28.070	2.423	1.454
4	1550.000	0.020	4.610	28.170	2.423	1.454
4	1560.000	0.020	4.610	28.300	2.422	1.453
4	1570.000	0.020	4.610	28.430	2.421	1.452
4	1580.000	0.020	4.610	28.560	2.420	1.452
4	1590.000	0.020	4.610	28.650	2.419	1.451
4	1600.000	0.020	4.610	28.760	2.418	1.451
4	1610.000	0.020	4.610	28.850	2.417	1.450
4	1620.000	0.020	4.610	28.880	2.417	1.450
4	1630.000	0.020	4.610	28.980	2.416	1.450
4	1640.000	0.020	4.610	29.040	2.416	1.449
4	1650.000	0.020	4.610	29.090	2.415	1.449
4	1660.000	0.020	4.610	29.120	2.415	1.449
5	0.000	0.040	0.040	26.130	0.021	0.013
5	5.000	0.040	0.040	25.810	0.021	0.013
5	10.000	0.030	0.030	25.610	0.016	0.010
5	20.000	0.050	0.050	25.290	0.027	0.016
5	30.000	0.050	0.050	25.300	0.027	0.016
5	40.000	0.060	0.060	25.440	0.032	0.019
5	50.000	0.070	0.070	25.610	0.037	0.022
5	60.000	0.080	0.080	25.730	0.042	0.025
5	70.000	0.090	0.090	25.930	0.048	0.029
5	80.000	0.100	0.100	26.120	0.053	0.032
5	90.000	0.110	0.110	26.320	0.058	0.035
5	100.000	0.120	0.120	26.450	0.063	0.038
5	110.000	0.140	0.140	26.620	0.074	0.044
5	120.000	0.150	0.150	26.810	0.079	0.048
5	130.000	0.160	0.160	26.930	0.084	0.051
5	140.000	0.170	0.170	27.120	0.090	0.054
5	150.000	0.180	0.180	27.250	0.095	0.057
5	160.000	0.190	0.190	27.350	0.100	0.060

Figura 4.25 Ventana de valores con formato tabular

Gráfica

Esta ventana, **Figura 4.26**, muestra de manera gráfica la evolución temporal de la presión de los reactores elegidos para realizar la prueba.

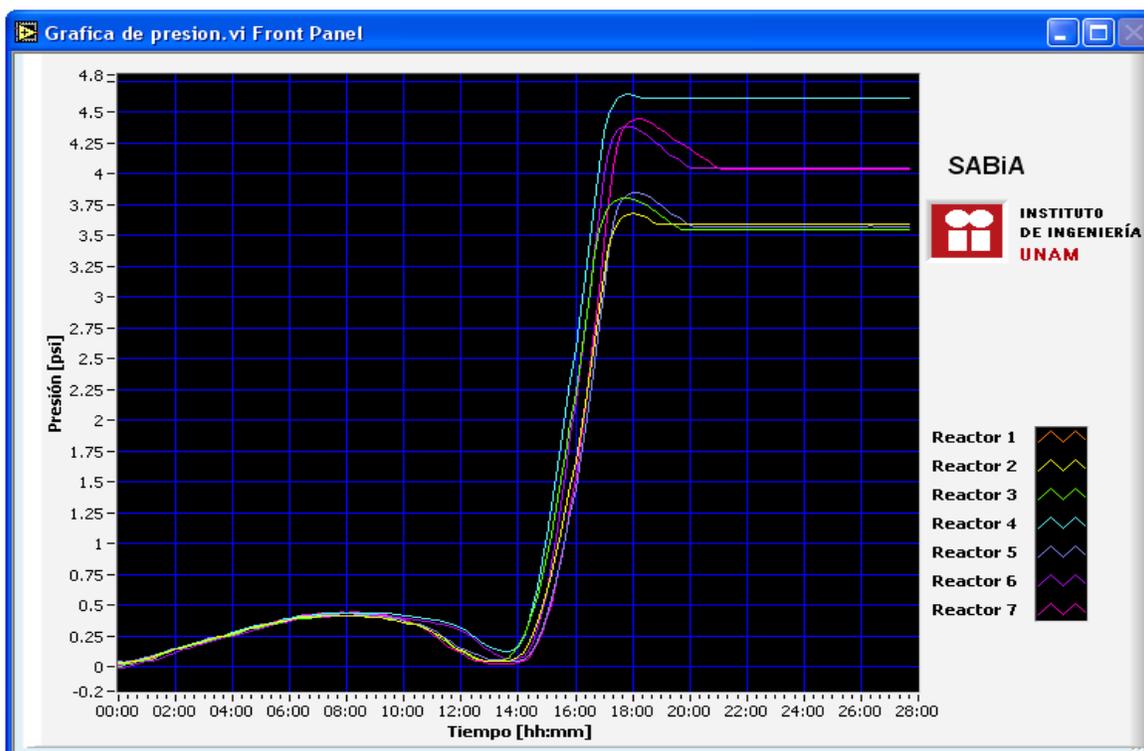


Figura 4.26 Ventana de gráfica

Capítulo 5

5.1 Resultados

En el presente capítulo, se analizan los resultados del proceso de reingeniería del sistema automatizado, así como los aspectos técnicos de funcionamiento, operación y costo. En primera instancia, se darán las características fundamentales del equipo conforme a los objetivos previamente establecidos. Posteriormente se realiza una comparativa con la versión anterior inmediata.

5.1.1 Funcionamiento

5.1.1.1 Calibración del equipo

La modificación de los parámetros de calibración se realiza desde el panel del subVI correspondiente al filtrado y *parametrización*. Para realizar el procedimiento de calibración fue necesario ajustar el offset de las señales provenientes de cada tarjeta de transductor de presión al mínimo (0.1 v aprox.). Seguido a esto, para calibrar el equipo se utilizó un baumanómetro como patrón, el cual tiene una resolución de 0.2 psi y un rango de 0-17 psi; es necesario apuntar que la resolución del equipo es mayor (0.01 psi), pero debido a la falta de un patrón fiable ésta se ajustó al patrón disponible. La calibración se realizó inyectando aire a cada uno de los 7 subsistemas y estableciendo su *parametrización* de manera individual. Las curvas de calibración obtenidas (**Figura 5.1**) indican una relación lineal. Para calibrar el equipo, es necesario establecer los parámetros de la relación:

$$Y = \mu X + b$$

donde

Y lectura de presión del sistema	X lectura de presión patrón
μ Pendiente	b ordenada al origen

Para obtener tales parámetros, primero se estableció una relación directa; esto es, haciendo a $\mu=1$ y a $b=0$. Posteriormente se realizó un barrido de la presión en todo el rango detectable de voltaje (0—10 v), después se obtuvieron los datos del voltaje registrado correspondientes a la presión patrón; y finalmente se hizo la regresión lineal, obteniendo de ello los valores de μ y b .

El procedimiento anterior es el mismo que fue seguido para calibrar el transductor de temperatura, utilizando un termómetro de mercurio con una sensibilidad de 0.5 °C y un rango de -30 a 150 °C.

Calibracion Transductor R6

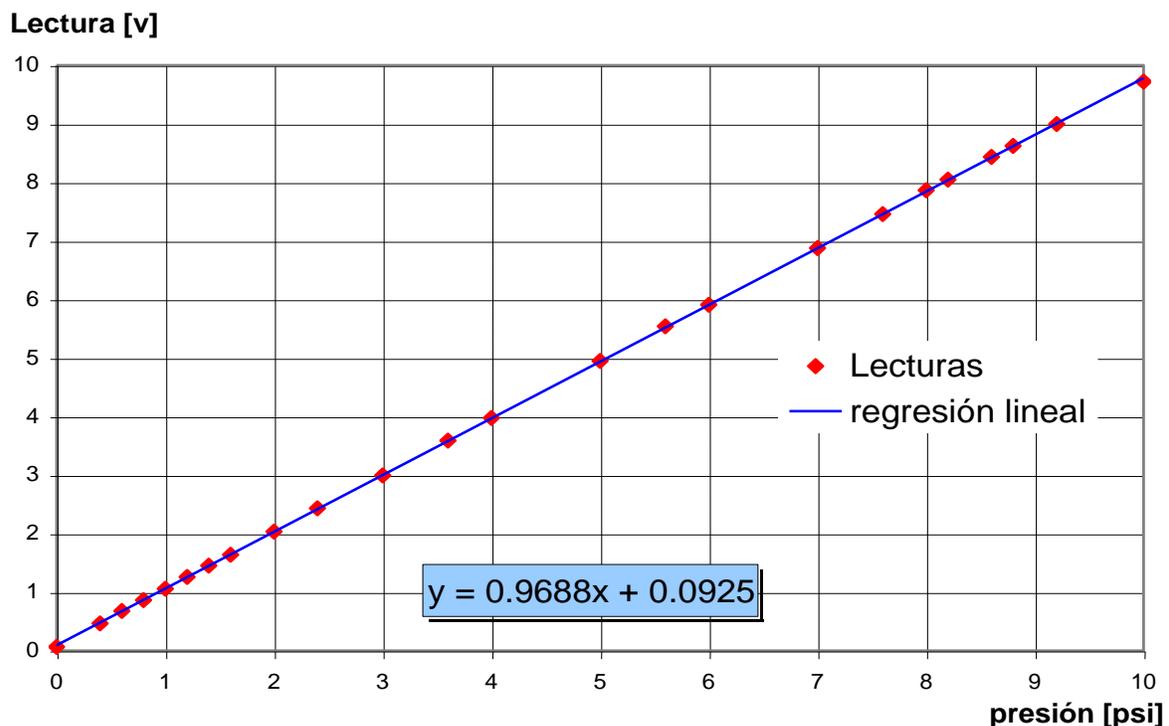


Figura 5.1 Curva de calibración obtenida para transductor R6

5.1.1.2 Prueba de fugas

Una vez calibrado el equipo se realizaron varias pruebas de fugas en las conexiones para flujo de biogás de cada reactor al interior del equipo. Las pruebas se realizaron inyectando aire a cada uno de los 7 subsistemas en un tiempo de 3 días con una presión de alrededor de 3 psi. La gráfica que se muestra a continuación corresponde a la ventana generada durante la ejecución del programa. Las variaciones en las lecturas son debidas a que durante la prueba el equipo estaba expuesto a variaciones de temperatura considerables de hasta 5 °C.

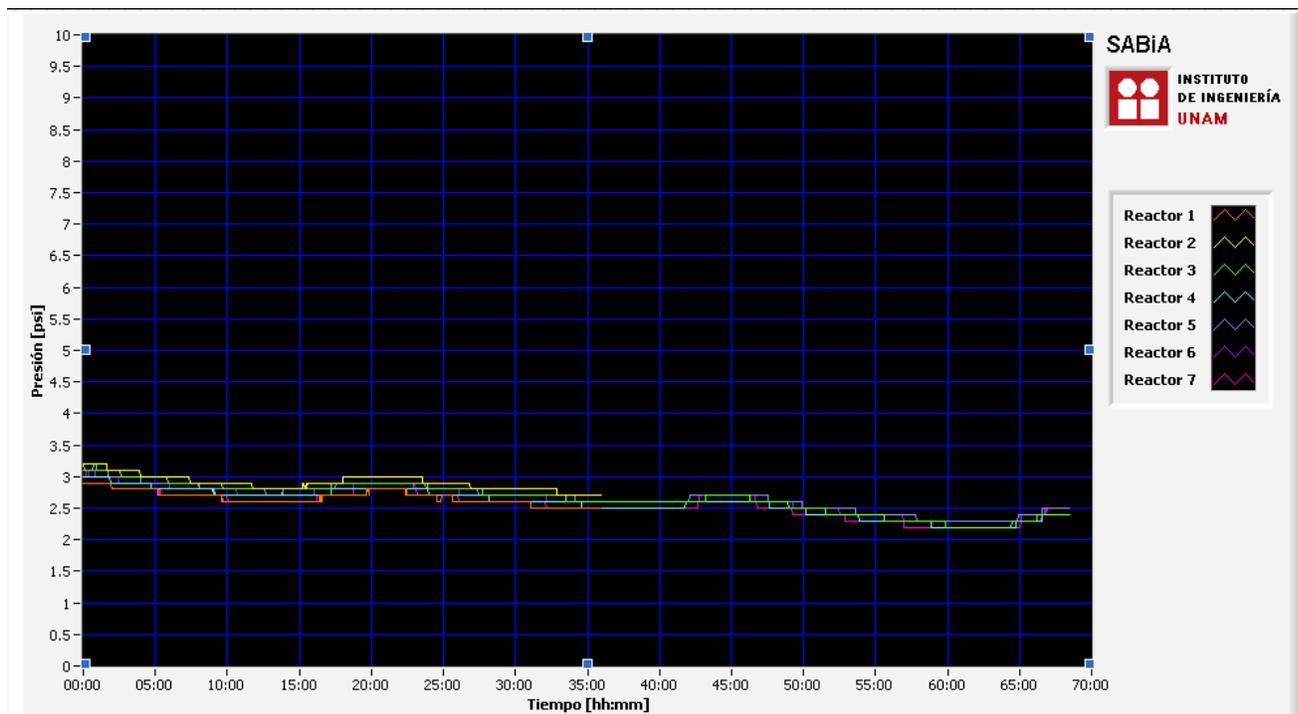


Figura 5.2 Curvas obtenidas de una prueba de fugas de 3 días

También se hicieron pruebas para presiones mayores de alrededor de 8 psi siguiendo la misma metodología, obteniendo resultados satisfactorios.

5.1.1.3 Prueba de algoritmos de software

Comprobación de control de presión

El algoritmo de control de presión fue probado con cada uno de los 7 subsistemas. A cada subsistema se le inyectó aire mediante un baumanómetro y se sobrepasó el valor máximo de presión permitida. El tiempo de respuesta del sistema, desde que se sobrepasa el valor hasta que se abre la válvula solenoide es casi instantáneo (200 ms aprox.), lo cual es muy satisfactorio considerando que los incrementos de presión en el proceso se dan de manera muy lenta.

Comprobación del control de paro por estabilidad

Para la implementación del paro automático por estabilidad se probaron diferentes algoritmos. El mejor resultado tanto en rendimiento como en requerimientos de cómputo es el control de paro tipo ventana. Para probar cada algoritmo se realizaron simulaciones de las señales analógicas provenientes de la salida de las tarjetas de los transductores de presión. El control de paro tipo ventana tiene un principio de funcionamiento básico, el cual se detalla en el capítulo anterior. Es importante resaltar que el control de paro automático no diferencia la etapa de latencia de la etapa de meseta, por lo que es preferible que el operador lo active una vez que se ha detectado la etapa de latencia. Para la comprobación del algoritmo, se realizaron pruebas a presión constante en cada uno de los reactores, y se configuró el programa de aplicación de tal manera que finalizara su ejecución por paro automático y no por fin de tiempo de prueba.

5.2 Experimentos realizados

Se realizaron pruebas de producción de hidrógeno a partir de la biodegradación anaerobia de glucosa usando diferentes inóculos: estiércol de vaca, lodo granular, lodo activado y composta, con un pH de 6.5 y a una temperatura de 26 °C. Los experimentos se realizaron por triplicado observándose los resultados de la **Figura 5.3**. Es notorio que el equipo tiene una muy buena repetibilidad, y resalta el hecho de poder hacer varias pruebas con réplicas a la vez, pudiendo así ahorrar tiempo y recursos. En otra prueba se determinó la influencia de la temperatura sobre las pruebas de producción de hidrógeno obteniéndose las curvas de la **Figura 5.4** donde nuevamente se observa buen desempeño del equipo¹.

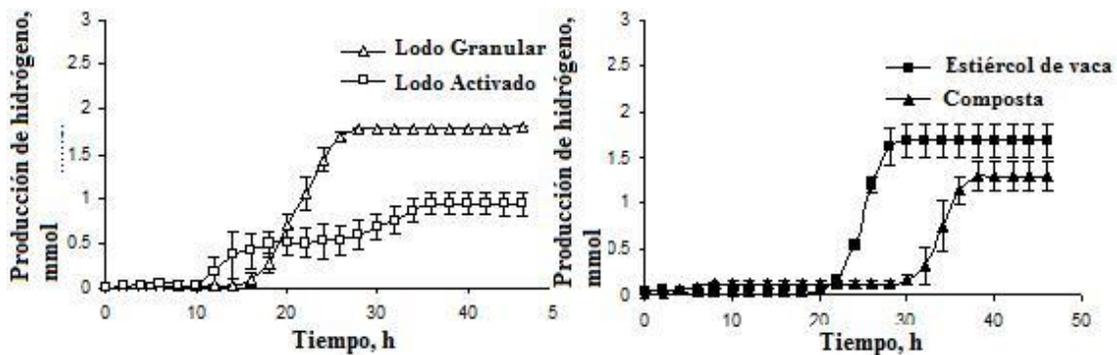


Figura 5.3 Producción de hidrógeno usando glucosa y cuatro diferentes fuentes de inóculo, en condiciones constantes de pH (6.5) y temperatura (26 °C)

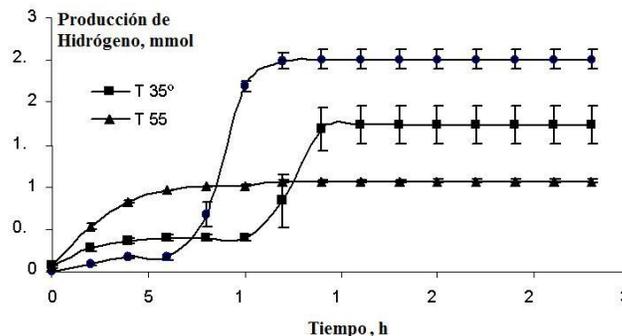


Figura 5.4 Influencia de la temperatura en la producción de hidrógeno a pH 6.5

¹ Estas pruebas fueron realizadas por el Ing. Alfredo Montes, quien pertenece al LIPATA, Instituto de Ingeniería, Campus Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México

5.3 Características generales del equipo SABiA

5.3.1 Generalidades

En la **Tabla 5.1** se resumen las características principales de operación del equipo SABiA.

Característica	Gabinete	
Capacidad	7 réplicas	
Alimentación	127 V _{ac}	
Consumo de energía	8 W*	
Variables de medición	Presión [psi]	Temperatura [°c]
Rango	0 — 10	0 — 100
Sensibilidad	0.1	0.1
Precisión	± 0.075	± 0.4

Tabla 5.1 Características principales del equipo SABiA

*Consumo máximo de energía

5.3.2 Límites de detección.

Un factor determinante para el buen desempeño del equipo son sus límites de detección. Los límites de detección se refieren a la capacidad del sistema de poder medir incrementos mínimos de presión debido a la acumulación de biogás en cada uno de los reactores y así poder cuantificar el número de moles de cada sustancia, utilizando para ello la ecuación de gases ideales (1).

$$n = \frac{PV}{RT} \dots (1)$$

En la ecuación anterior, las variables que involucran directamente al diseño del sistema respecto a sus límites de detección, son:

- $V \rightarrow$ volumen donde se atrapa el biogás; el cual queda integrado por el volumen no ocupado por el líquido en la botella (V_{rb}) y los volúmenes de manguera utilizados para el flujo de biogás (V_{mf}) considerado desde la botella hasta el interior del equipo .
- $P \rightarrow$ sensibilidad del transductor de presión utilizado, lo cual corresponde a la presión mínima que se puede detectar ($P_{md} = 0.1[\text{psi}]$).

La temperatura (T) no es considerada para determinar los límites de detección, puesto que es uno de los factores asignados por el experimentador. Para efectos del equipo SABiA, los valores de volumen se asignan considerando una situación extrema, esto es que el volumen en la botella es total (no hay líquido), lo que da por resultado:

$$\#mol=0.07 \text{ mmol}$$

$$V= V_{rb}+V_{mf} ; \text{ donde } V_{rb}=250 \text{ ml y } V_{mf}=5 \text{ ml}$$

5.3.3 Costos

La implementación del sistema se diseñó de manera estricta a implementar un equipo de bajo costo. El diseño del equipo se delineó de tal forma para no sobrepasar el presupuesto establecido. Es por ello que como parte fundamental de los resultados obtenidos se muestra a continuación en detalle en la **tabla 5.2** , el costo total del equipo implementado, considerando que sólo comprende los materiales y no el costo del desarrollo en sí.

Componente	Costo \$ USD
NI-USB 6008	175
Transductor de presión Honeywell (7)	210
Transductor de temperatura	1
Electroválvulas Festo (7)	275
Racores y tubo flexible	200
Material de electrónica	100
Gabinete	70
TOTAL	1031

Tabla 5.2 Costos del equipo SABiA

Puntualizando sobre los costos del equipo, si la arquitectura contemplara el uso de válvulas multiplexoras, se elegiría para mejorar el diseño una válvula de 8 entradas y una salida, que tenga las mismas especificaciones que las que se utilizaron en versiones anteriores, el costo únicamente de este tipo de válvula asciende a \$1050 USD².

En resumen los costos de materiales del equipo SABiA ascienden a aproximadamente \$1031 USD, lo cual es muy bajo, considerando los costos de equipos comerciales de esta naturaleza, e inclusive comparado con las versiones desarrolladas anteriormente en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Por supuesto, a este costo aproximado, habría que sumar los costos asociados al software LabView 7.1 (el cual tiene precios diversos dependiendo de quien lo compre), además de los costos de diseño y de manufactura.

² Costo corriente al momento de desarrollar este proyecto

5.4 Objetivos cumplidos

Al inicio de este trabajo de tesis, se plantearon objetivos sobre los cuales está basada la reingeniería del sistema. A continuación se analizan y se discute su alcance.

- ✓ Confiabilidad de resultados obtenidos.

La confiabilidad de los resultados obtenidos incluye al equipo en su conjunto. El diseño de hardware permite la realización de hasta 7 réplicas del mismo experimento; haciendo posible el ahorro de recursos y tiempo de experimentación para la validación de resultados. El software permite la calibración de los sensores de manera fácil. Por otra parte, y como resultado de la arquitectura con 7 transductores, la detección de fallas para fugas de biogás no requiere preparación *exprofeso* y mejora las condiciones anaerobias del experimento.

- ✓ Evitar inhibición en producción de biogás debido a la presión acumulada.

La arquitectura y el monitoreo en línea de la presión de cada subsistema hace que sea posible no sólo evitar la inhibición en producción de biogás, sino también tener un control de sobrepresiones causantes de inhibición. El programa de aplicación permite tener un control activo del valor de presión dentro de cada subsistema. Este valor es asignado por el usuario durante el desarrollo del experimento. El hecho de controlar el valor de presión evita purgados innecesarios.

- ✓ Incrementar el seguimiento de la presión en su evolución temporal.

El equipo SABiA realiza el monitoreo de presión en línea; contrastando de manera substancial con las versiones anteriores en las que el monitoreo se hacía como mínimo en periodos de 30 min.

- ✓ Ampliar el rango de sensibilidad.

La correcta elección del transductor de presión, así como el diseño de las tarjetas de adecuación de señal y el filtrado digital permiten obtener una sensibilidad de 0.1 psi, ampliando con ello los límites de detección del equipo.

- ✓ Facilitar el mantenimiento.

El diseño modular tanto en hardware como en software, facilita el mantenimiento e intercambio de componentes. Los conectores tipo racor-rápido, con los cuales se conectan las mangueras para flujo de biogás, dan la capacidad de tener tiempos mínimos de interconexión con poca probabilidad de fugas. El diseño modular tiene como característica a resaltar la expansión del equipo si así se desea.

- ✓ Portabilidad.

Las dimensiones del gabinete y la conexión USB con la computadora cumplen los requerimientos de portabilidad. El aseguramiento de los componentes dentro del gabinete mediante la estructura de dos niveles, permite que el equipo sea transportado de forma confiable.

- ✓ Mejorar operación de software.

La forma como opera ahora el programa de aplicación facilita su uso. El diseño de las diferentes ventanas de programa y de los elementos contenidos en ellas, hace que el operario simplifique las operaciones para configurar las opciones que desea. Durante la ejecución, el operario recibe orientación acerca de los diferentes campos de los cuales está constituida la ventana en turno. El diseño del panel principal y las ventanas de gráfico y tabla, simplifican la visualización y obtención de la información; permitiendo una mejor comprensión de las condiciones en las que se está llevando a cabo el experimento. El ordenamiento

de los registros de presión, y sus respectivos cálculos en el archivo, contribuyen al análisis y obtención de resultados.

5.5 Comparación con la versión anterior

Una manera de evaluar los resultados obtenidos, es contrastando la versión anterior inmediata del equipo con el equipo SABiA. Las características de operación y funcionamiento de ambos equipos se han descrito ampliamente en apartados anteriores, por lo que la comparación entre los dos equipos se enfocará a las características que aún no han sido comparadas. Las que destacan por su diferencia son:

5.5.1 Tamaño

La diferencia de tamaño se ejemplifica mediante la fotografía que compara a los dos equipos (**Figura 5.5**). Resalta el hecho de la disminución de las dimensiones del equipo SABiA. Dentro de su gabinete se encuentran 7 transductores de presión y la tarjeta de adquisición de datos, mientras que este último elemento en el equipo anterior se encontraba dentro del CPU que contenía el programa de aplicación.



Figura 5.5 Diferencia de tamaño entre equipo SABiA y la versión anterior

5.5.2 Costo

Para efectos de la comparación de costo sólo se toman en cuenta los elementos que conforman el hardware del equipo que realizan una función similar, sin tomar en cuenta los elementos que reutiliza la versión actual (botellas).

Elemento	Ver. anterior \$USD	SABiA \$USD
Tarjeta de adquisición de datos	1245	175
Transductor(es) de presión	337	210
Transductor de temperatura	1	1
Válvulas	1421	275
Conexiones y tubo flexible	232	200
Material de electrónica	256	100
Gabinete y estructura de montaje	52	70
TOTAL	3544	1031

Tabla 5.3 Comparativa de costos entre equipo SABiA y la versión anterior

Los costos de la **Tabla 5.3** están actualizados, para mayor referencia de los elementos con los cuales está constituido el equipo anterior ver Salazar, 2006.

5.6 Recomendaciones

A continuación se presentan algunas recomendaciones para mejorar el funcionamiento del equipo SABiA, así como de su mantenimiento.

5.6.1 Cambiar las botellas

Los resultados de prueba y experimentación del equipo SABiA muestran que, a pesar del cuidado para evitar las fugas de biogás en los subsistemas, estas siguen ocurriendo. La principal causa de fugas son las botellas utilizadas, ya que la rosca de la tapa no cierra correctamente y las olivas no están bien montadas sobre esta. Para solucionar el primer problema, es necesario adherir cinta teflón a la rosca de la botella. Las fugas debidas a orificios en el montaje de las olivas se pueden solucionar sellando con silicón o cambiando las tapas por unas nuevas.

Desgraciadamente, durante el desarrollo de este trabajo de tesis, no se pudieron cambiar por el tiempo de entrega que tienen y el costo que representan. En resumen, como recomendación principal para la operatividad del equipo es el cambio de las botellas, poniendo especial énfasis en su forma de cierre y las conexiones necesarias para manguera.

5.6.2 Ampliación del sistema

Dentro del seguimiento del proyecto de equipos para pruebas de biodegradabilidad, algo que queda fuera de los objetivos de este trabajo, es la ampliación del sistema. Esto es, que el equipo incluya una incubadora y agitador propios con el fin de poder incluir dentro de las tareas automatizadas el control de temperatura y la agitación. Esto se puede realizar con el hardware actual, puesto que la tarjeta de adquisición de datos tiene 2 canales analógicos de salida aún no utilizados, los cuales son idóneos para realizar este tipo de control.

5.6.3 Mantenimiento

Con respecto a las recomendaciones para mantenimiento del equipo, se hacen las siguientes:

5.6.3.1 Calibración

La calibración del equipo se realizó con un patrón que tiene una resolución mucho más amplia (0.2 psi). El equipo, en el sensado de presión, presenta una resolución mayor (0.01 psj). La razón de haber disminuido la resolución es por no disponer de un instrumento patrón fiable para realizar la calibración. La reducción de la resolución se hizo mediante software. Para ello fue necesario redondear los valores de presión a decimales. Para aumentar la resolución basta con modificar el software para que este redondeo sea en centésimas, lo cuál resulta sencillo y aumenta las prestaciones del equipo. Por otro lado, es aún más recomendable emplear un generador de presión con mayor resolución para realizar la calibración del equipo.

5.6.3.2 Reemplazo de componentes

El reemplazo de componentes requiere del conocimiento de la arquitectura del equipo. Al cambiar la disposición de los componentes eléctricos (presión, temperatura y válvulas) se debe tener cuidado en la correspondencia de elementos. Que cada subsistema esté integrado con su correspondiente válvula, transductor de presión y conexiones para flujo de biogás, además de sus correspondientes señales, tanto de entrada y salida, de la tarjeta de adquisición de datos. Al reemplazar alguno de los componentes de la estructura ubicada al interior del gabinete es recomendable desmontarla y hacer las modificaciones fuera, para ello sólo basta quitar los tornillos de la base.

De tarjetas

Al reemplazar alguna de las tarjetas de adecuación de señal es recomendable verificar las conexiones de alimentación (12 V_{DC}) y salida de señal analógica para el caso de tarjetas de transductores, y de alimentación (24 V_{DC}), así como de la entrada digital para el caso de tarjeta de válvulas.

Interconexiones para flujo de biogás.

Para modificar y/o reemplazar la manguera utilizada para flujo de biogás dentro del gabinete, es necesario que su extensión sea la misma que la que reemplaza, ya que el volumen tomado en cuenta en el software es una constante. Además de tener cuidado en el tipo de corte en los extremos; si no se realiza un corte vertical este puede ser causa de fugas.

5.7 Conclusiones

El equipo SABiA ofrece una solución con alto nivel de integración. Su desempeño y arquitectura tienen como principales características:

1. El monitoreo de la presión en cada uno de los reactores de prueba se realiza en línea.
2. Existe un control de las sobrepresiones causantes de inhibición en la producción de biogás.
3. Mejora las condiciones anaerobias del experimento al no realizar purgas de biogás tan frecuentemente como otros equipos automatizados.
4. La disposición de los elementos de hardware dentro de un gabinete hace que se tenga una solución completa, portátil y de fácil manejo y calibración.
5. Teniendo una PC con el programa de aplicación, es posible realizar la prueba con tiempos mínimos de interconexión.

El desarrollo de nuevas tecnologías hace posible la implementación de un sistema con alto nivel de integración, caracterizado por el mejoramiento de las condiciones de monitoreo y control en este tipo de pruebas. La aplicación práctica de sus componentes, tanto en software como hardware, permite establecer este tipo de sistema como un producto manufacturable, flexible, de bajo costo y fácil mantenimiento.

Apéndice A

En el presente apartado se reporta el código restante del programa de aplicación, el cuál está constituido por el subVI de parámetros globales y los subVI's (subrutinas) de programa. Se muestra el ícono de identificación con su respectivo código y su panel frontal, en el caso de que el panel de la subrutina se muestre al usuario.



Ventana no activa de programa.

Variables globales utilizadas durante la ejecución de programa en diferentes subVI's.



Figura A.1 Parámetros globales del programa de aplicación

A.1 Inicio de programa

Código de subVI's, íconos y características del programa de aplicación para el bloque de inicio del programa.

Creación de archivo. Ventana y código.

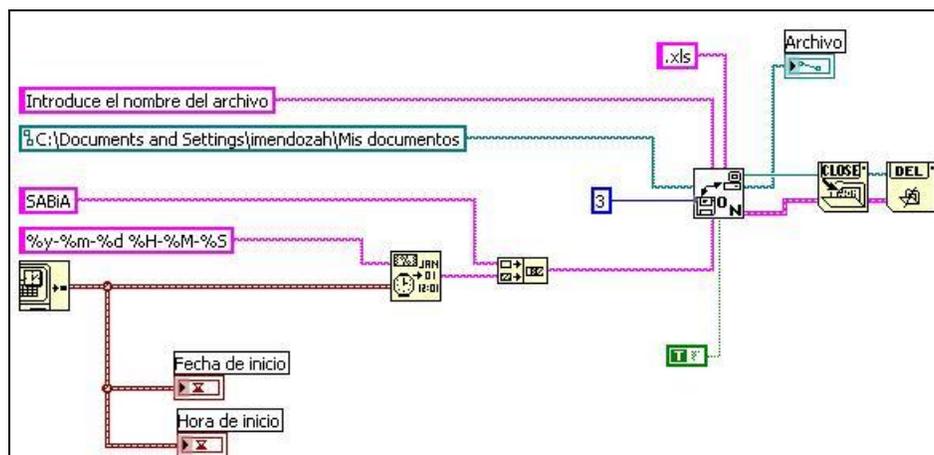
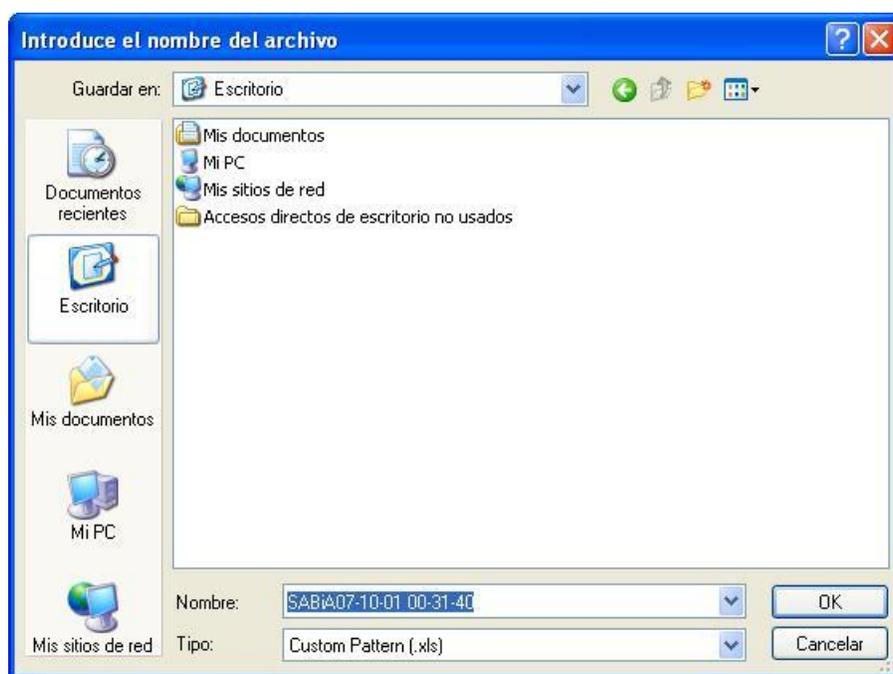


Figura A.2 Ventana y código correspondiente para crear archivo



Ventana activa de programa.

Tipos de definición de volúmenes, tipo de prueba y porcentajes de sustancias.

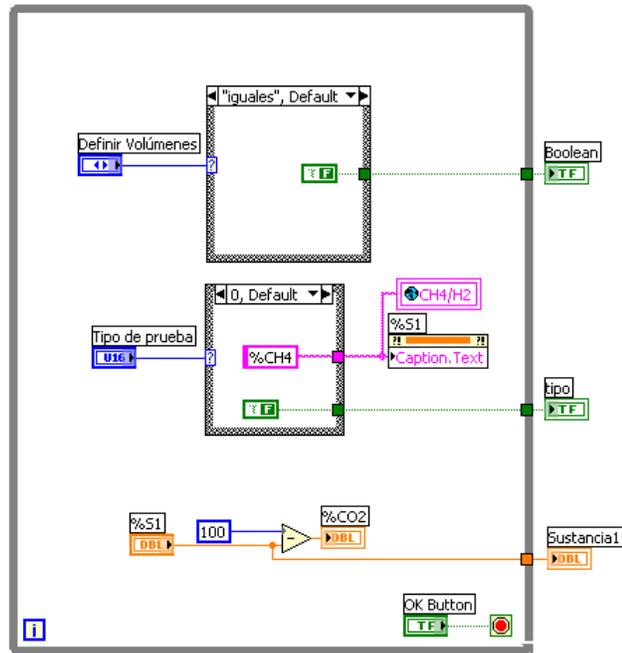
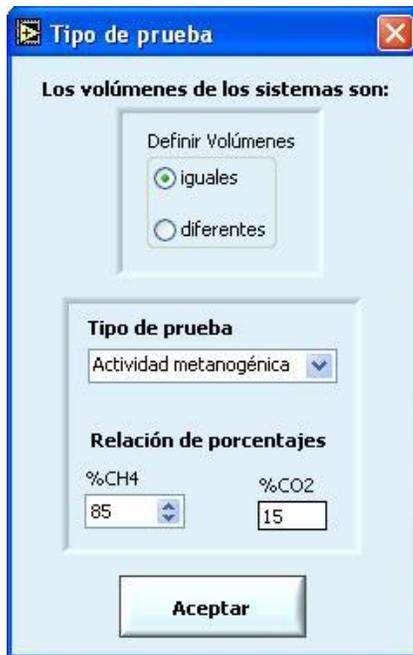


Figura A.3 Ventana y código de ejecución para definir volúmenes tipo de prueba y relación de porcentajes de sustancias

El programa incluye una modalidad para ejecutarse como prueba de producción de hidrógeno, en la cual los procedimientos seguidos son muy similares a una prueba de biodegradabilidad anaerobia. En la ejecución del programa sólo se cambian la nomenclatura de las sustancias de la cual se espera mayor producción, metano (CH₄), para pruebas de biodegradabilidad, o bien, hidrógeno (H₂) para pruebas de producción de hidrógeno.

Las siguientes dos ventanas son condicionales, en ellas se eligen los sistemas a utilizar y se definen los volúmenes de cada uno. Cada una de ellas contiene un indicador de *status*, el cual evita que el usuario introduzca valores erróneos o incongruentes en la configuración; si alguno de los campos contiene un valor incongruente, el usuario no podrá continuar con el flujo de programa.



Ventana activa y condicional de programa.

Elección de sistemas a utilizar, definición de volúmenes de forma general y duración de prueba

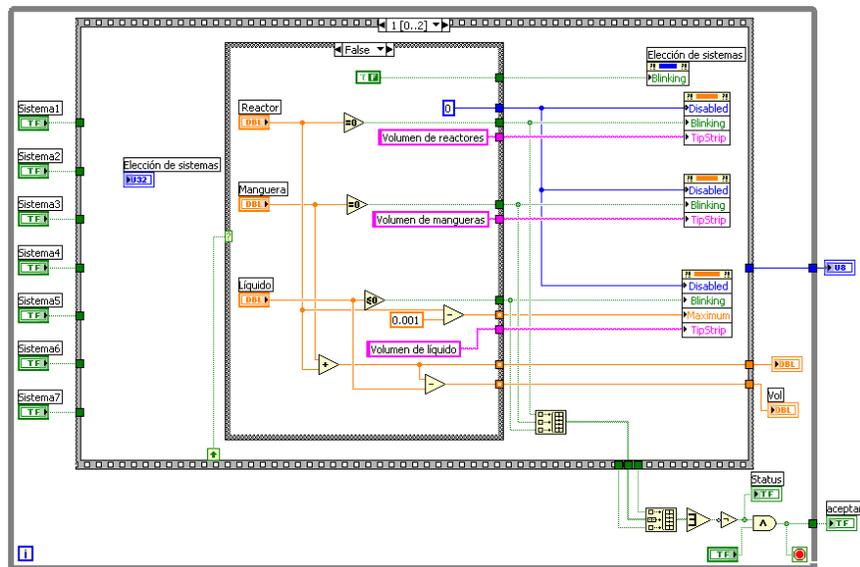
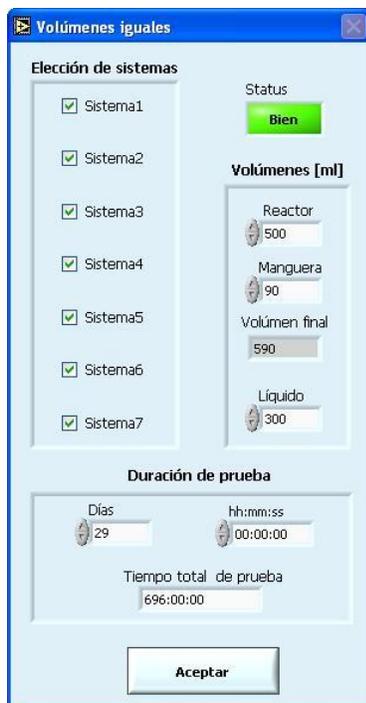


Figura A.4 Ventana para definir volúmenes de manera general



Ventana activa y condicional de programa

Elección de sistemas a utilizar, definición de volúmenes de individual y duración de prueba

Sistema	Reactor [ml]	Manguera [ml]	Líquido [ml]	Vol R [ml]
Sistema1	500	90	200	590
Sistema2	0	0	0	0
Sistema3	0	0	0	0
Sistema4	700	120	300	820
Sistema5	0	0	0	0
Sistema6	0	0	0	0
Sistema7	0	0	0	0

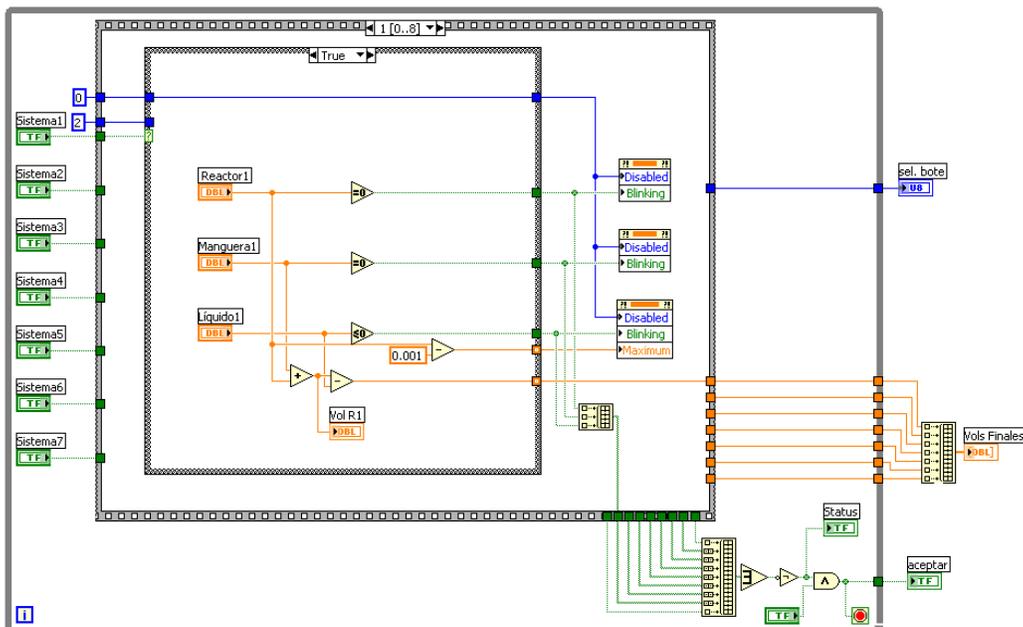
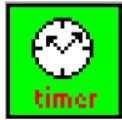


Figura A.5 Ventana para definir volúmenes de manera individual

A.2 Ciclado de programa



Temporizador principal de programa y temporizador de registro de lecturas para archivar los datos.

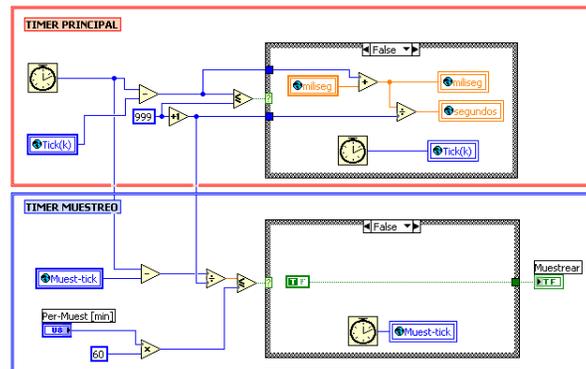


Figura A.6 Código de temporizador principal y de registro de lecturas



Filtrado de las señales provenientes de los 8 canales analógicos, media aritmética y parametrización. En esta subrutina se establecen los parámetros de calibración.

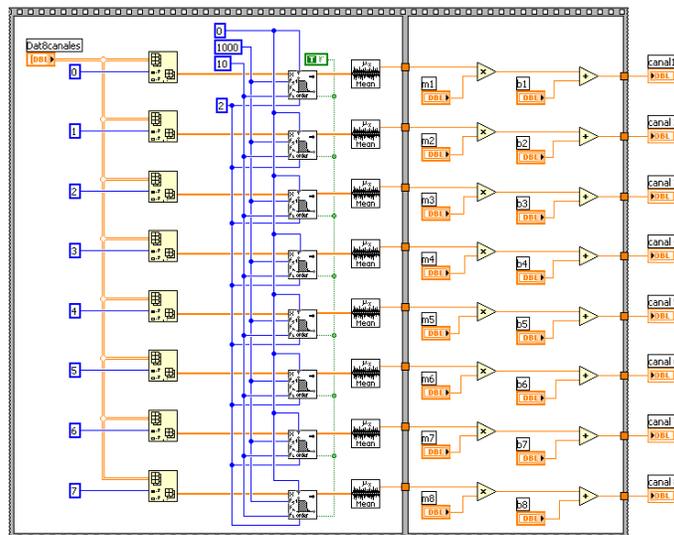


Figura A.7 Código para filtrado digital y parametrización



Control de máxima presión permitida en reactores para evitar inhibición en la producción de biogás.

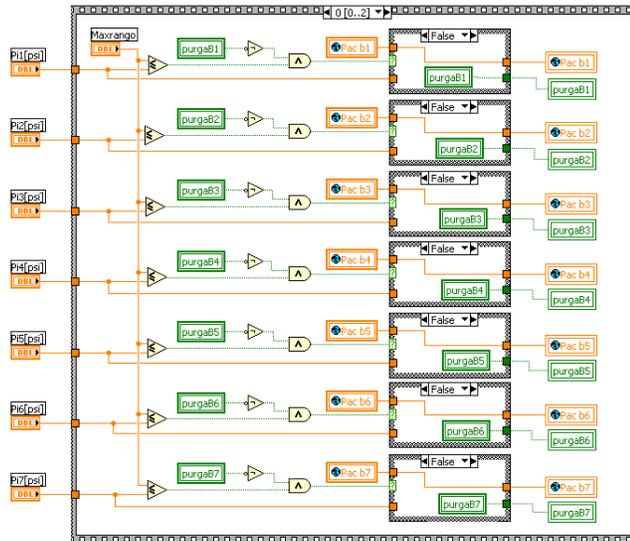


Figura A.8 Control de máxima presión permitida en reactores



Ventana no activa de programa

Control de paro por tiempo de estabilidad de presión en rectores.

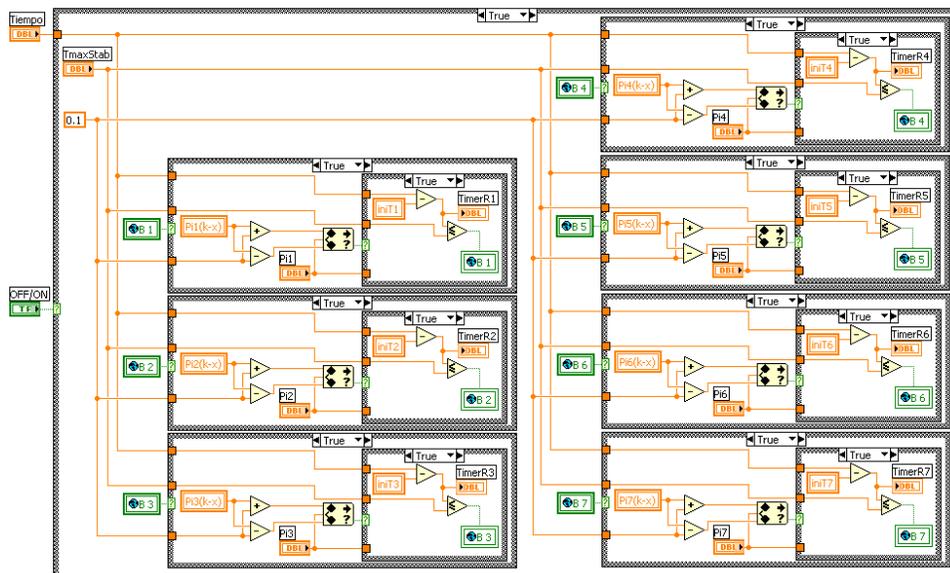


Figura A.9 Control de paro por tiempo de estabilidad

El siguiente código se ejecuta una vez cumplido el periodo de registro.



Cálculo de porcentaje de sustancias en mmol mediante la ecuación de gases ideales y arreglo de datos.

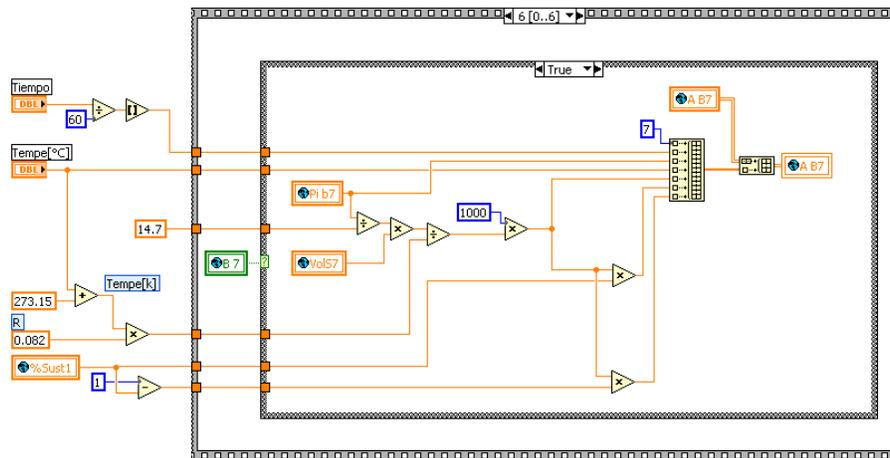
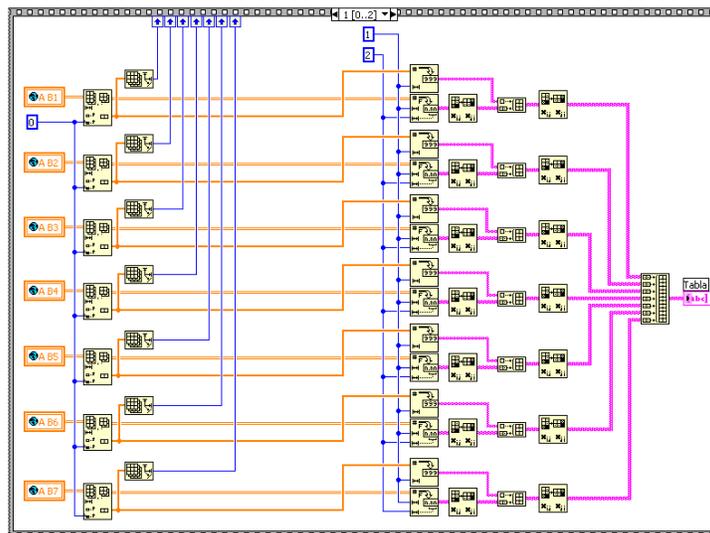


Figura A.10 Código para calcular el porcentaje de sustancias en mmol



Ventana activa de programa

Conversión de datos numéricos a tipo texto y despliegue de éstos en forma tabular.





Ventana activa de programa

Despliega registros de presión en su evolución temporal en forma gráfica.

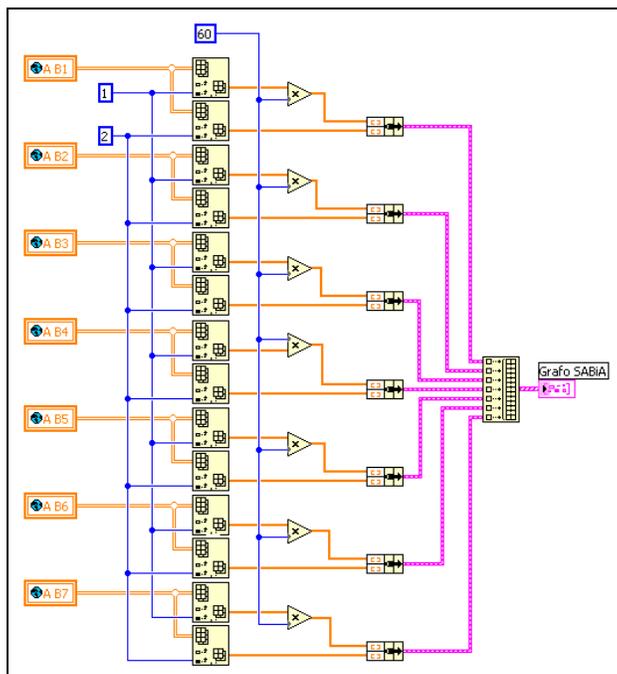
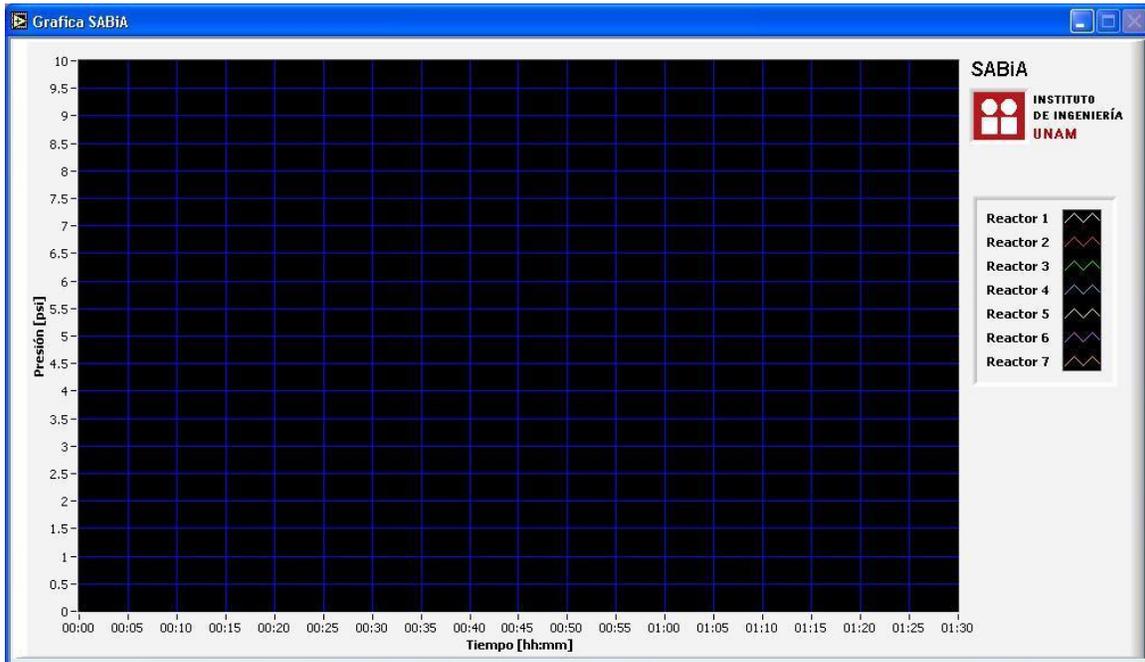


Figura A.13 Ventana y código del registro de datos en forma de gráfica



Ventana no activa de programa

Condiciones de paro de programa (estabilidad de presión en reactores y fin de tiempo de prueba).

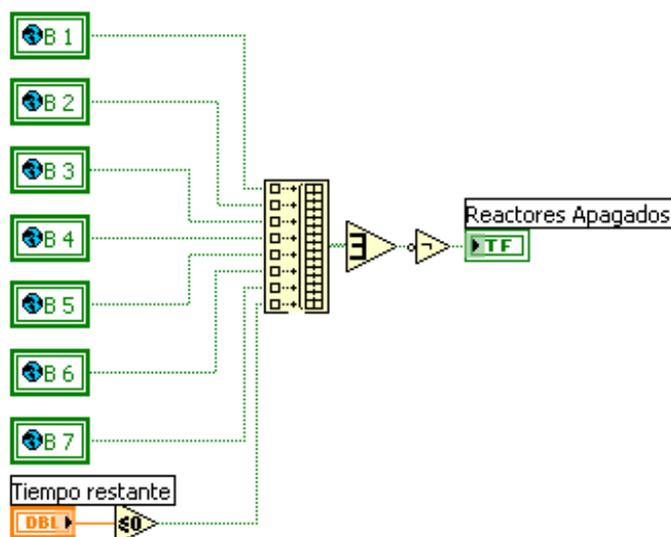


Figura A.14 Rutina de verificación de condiciones de paro de programa

A.3 Fin de programa

Copia de archivo de respaldo con nombre y ruta de archivo original.

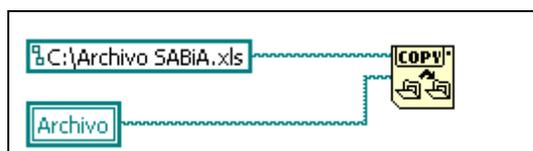


Figura A.15 Código de fin de programa

A.4 Configuración de tarjeta de adquisición de datos



A continuación se reporta los detalles sobre la configuración de la tarjeta de adquisición de datos USB 6008. Para la configuración se utilizó la aplicación DAQmx, desde la cual se genera el código correspondiente para la entrada y salida de datos, así como la comunicación con la PC. La tarjeta debe tener el nombre de dispositivo “dev1”. Si en el sistema no aparece con tal nombre, se generará un error en la ejecución de programa. Para los canales analógicos, se utilizó la siguiente configuración:

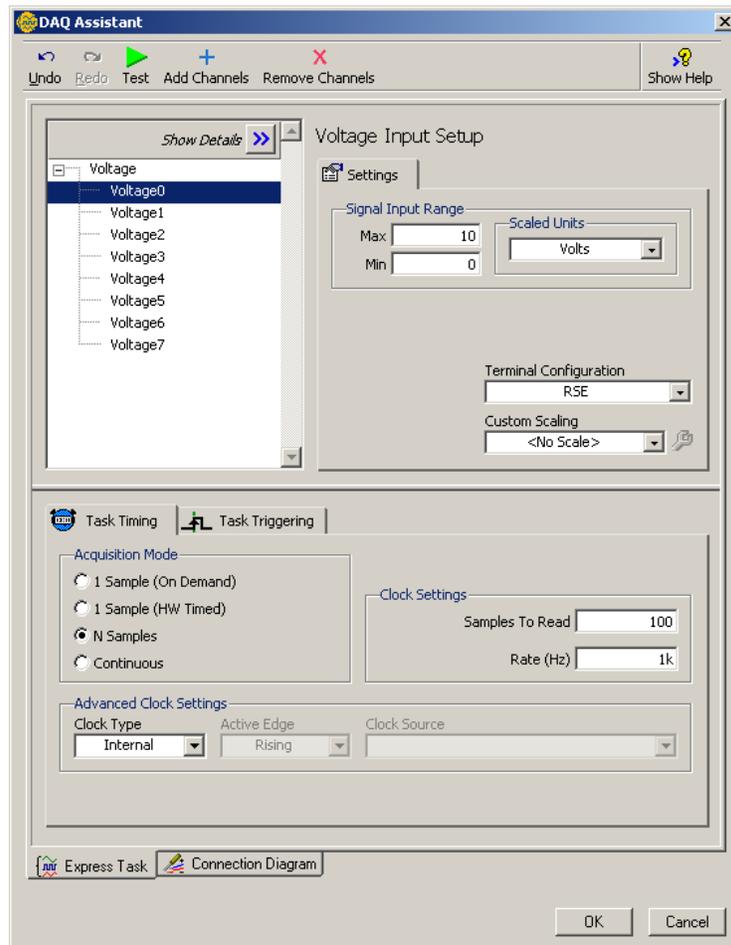


Figura A.16 Configuración de la TAD para canales analógicos de entrada

Para configurar los 6 canales de salida digitales utilizados, se realizó la siguiente configuración:

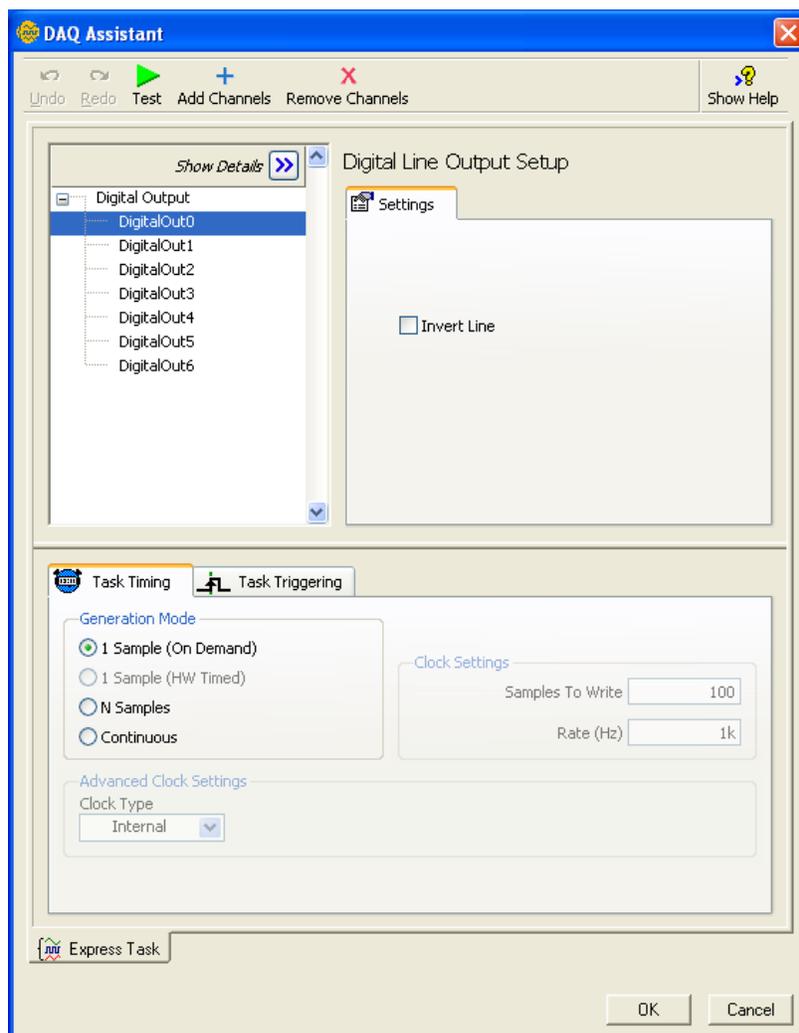


Figura A.17 Configuración de la TAD para canales digitales

Apéndice B

Actividades derivadas de la realización de éste proyecto

Al término de la etapa de construcción del equipo, y después de efectuar varias pruebas en el laboratorio, se inscribió el equipo a un concurso llamado “NI University Challenge 2007” donde los requisitos eran que se tratara de un proyecto académico y que utilizara una tarjeta USB 6008 de la marca National Instruments.

Se obtuvo el primer lugar, por lo que fue publicado un artículo en la revista “Cociente” y además fue aceptado en el 6º Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico, que se realizó del 8 al 10 de octubre de 2008 en Cuernavaca, Morelos, México.

A continuación se adjunta el artículo que será presentado en el CIINDET 2008.



Desarrollo de SABiA, un equipo para automatizar pruebas de biodegradabilidad anaerobia

A. Vargas, member IEEE, I. Mendoza, J.C. Moreno

Resumen: Se presenta el desarrollo y concepción de un equipo para automatizar pruebas de biodegradabilidad anaerobia. El equipo opera a través de software desarrollado en LabView y una tarjeta de adquisición de datos de bajo costo. La operación se basa en técnicas manométricas para estimar la producción de biogás durante la biodegradación y usa sensores de presión independientes, así como electroválvulas de purga de tamaño compacto. El resultado es un equipo de bajo costo relativo

Palabras Clave: prueba de biodegradabilidad, proceso anaerobio, automatización, adquisición de datos de bajo costo

Abstract: The design and development of equipment for performing automatic biodegradability tests is presented. It operates using LabView software and a low-cost data acquisition card. Its operation is based on manometric techniques to estimate the biogas production and uses independent pressure sensors, as well as compact electrovalves for purging. The result is a relatively low-cost useful equipment.

Keywords: biodegradability test, anaerobic process, automation, low-cost data acquisition.

Introducción

En ingeniería y tecnología ambiental es muy importante determinar el nivel de biodegradabilidad de una sustancia. El procedimiento usual mide la eficiencia de remoción después de un tiempo fijo [1]. Sin embargo, resulta más útil determinar la velocidad de degradación promedio por unidad de biomasa, siguiendo la cinética de biodegradación al hacer la prueba.

Todos los autores pertenecen al Laboratorio de Investigación en Procesos Avanzados de Tratamiento de Aguas, Instituto de Ingeniería, Campus Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México, Blvd. Juriquilla 3001, Querétaro 76230, Tel. 55-5623426566, Fax 55-56162798 (e-mail: {AVargasC,IMendozaH, JMorenoH, }@ii.unam.mx).

Se agradece el apoyo financiero de la DGAPA-UNAM para la realización de este trabajo, bajo el proyecto IN107108.

Para procesos anaerobios el biogás producido (metano, dióxido de carbono, hidrógeno y/o sulfuro de hidrógeno) como resultado de las reacciones bioquímicas puede ser medido por técnicas manométricas, pero el muestreo manual presenta serias desventajas [2]. Estas técnicas permiten estimar la producción de biogás consisten en medir el incremento de presión dentro de un reactor a temperatura constante. Relacionando esta variación mediante la ecuación de gases ideales, es posible estimar la cantidad de biogás (producto de la biodegradación).

Existen diversos equipos automatizados comerciales para efectuar pruebas de biodegradabilidad [3], pero su costo es elevado. Este trabajo presenta el desarrollo de un equipo denominado SABiA (Sistema Automático de Biodegradabilidad Anaerobia), que fue construido usando una tarjeta de adquisición de datos de bajo costo, sensores de presión en circuito integrado y electroválvulas pequeñas. El resultado es un equipo portátil, del tamaño de una caja pequeña, flexible, con una interfaz amigable al usuario y de muy bajo costo comparativamente.

Descripción del equipo desarrollado

Descripción física: El equipo desarrollado provee de una solución práctica para resolver los problemas encontrados en otros equipos de pruebas automáticas de biodegradabilidad o producción de biogás. Su arquitectura básica se muestra en la Figura 1.

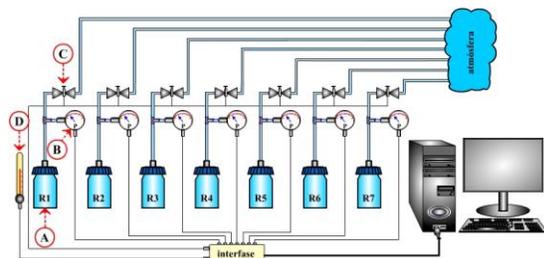


Fig. 1 Arquitectura del equipo SABiA: (A) biorreactor anaerobio cerrado, (B) transductor de presión miniaturizado, (C) válvula de purga, (D) sensor de temperatura.

En el equipo se utiliza un transductor de presión por cada biorreactor. Esto hace que la operación del equipo SABiA se reduzca al monitoreo en línea de la presión en cada reactor durante el tiempo de prueba, registrando los valores en un archivo solamente cuando el periodo establecido por el usuario se cumple. Para evitar la inhibición en la producción de biogás debida a la acumulación de presión, el software desarrollado contiene un control de máxima presión permitida en cada reactor. Abre la válvula de purga correspondiente únicamente cuando este valor es rebasado.

El equipo está basado en un sistema de adquisición de datos usando una tarjeta de adquisición de datos (TAD) con conexión USB a una computadora personal (PC), donde las señales son filtradas, acondicionadas y analizadas mediante el software LabVIEW (National Instruments). Los transductores de presión son de tamaño compacto y van montados sobre una tarjeta de circuito impreso.

Hardware: Está integrado principalmente por los elementos sensores (presión y temperatura), las válvulas y la TAD USB6008 de NI. Todos ellos están dispuestos dentro de un gabinete, cuya fotografía se muestra en la **Figura 2**. La conexión entre el gabinete y la PC que contiene el software de aplicación es vía puerto USB. Una de las características principales del equipo es el diseño modular de sus componentes y su alto nivel de integración y flexibilidad. Los biorreactores consisten en botellas de vidrio donde se coloca la muestra a analizar. Para el caso de la producción de hidrógeno se coloca una preparación de agua con nutrientes y sustrato, adicionado con un

inóculo. Cada botella tiene una tapa hermética con racor rápido para conexión de tubo flexible de 4mm de diámetro (Festo PUN-H). Estos biorreactores son colocados en un agitador orbital que a su vez está en una incubadora a temperatura constante (véase la Figura 2).

Los sensores de presión empleados son de tamaño pequeño (Honeywell, modelo SX15GD2) y se montan sobre un circuito impreso (PCB). Son de muy bajo costo y cumplen con los requerimientos para los gases y especificaciones técnicas del equipo. Para cada sensor se ha hecho un circuito impreso con todos sus acondicionadores de señal. Las mangueras flexibles provenientes de cada biorreactor se conectan directamente a cada sensor. En cada uno de estos módulos se ha montado también la válvula de purga (Festo, modelo MHA1). Todas las conexiones neumáticas se hacen con mangueras flexibles (Festo PUN-H) y racores de conexión rápida.



Fig. 2 Equipo SABiA funcionando

Las prestaciones de la TAD USB6008 hace posible que se tenga una capacidad de monitoreo de hasta 7 reactores (presión). El monitoreo de la temperatura se logra mediante un circuito integrado (LM35) montado en otra tarjeta de circuito impreso con la electrónica requerida. El uso de la TAD USB6008 permite que la interconexión de hardware se realice de manera rápida y simple.

Software: La aplicación de software está desarrollada en el lenguaje de programación LabVIEW 7.1. Básicamente el programa realiza las tareas de adquisición de datos, procesamiento, análisis, archivado y visualización de éstos, y acciones de control en el



sistema. La arquitectura del programa es también modular.

El usuario decide cada cuánto se registran las lecturas de presión y cuánto es la presión máxima admisible antes de realizar una purga. Al iniciar el experimento, se inician los registros de datos y se despliegan al usuario. Así se continúa periódicamente hasta que alguno de los biorreactores ha acumulado suficiente biogás como para requerir una purga. Entonces se manda la señal para abrir la electroválvula correspondiente y se espera a que la presión en el biorreactor llegue a la atmosférica. A los siguientes registros de presión para ese biorreactor se le suma la presión acumulada hasta antes de la purga.

El programa contiene también la opción de paro automático por estabilidad en las lecturas de presión, en vez de esperar a que transcurra el tiempo de prueba especificado por el usuario. Con ello se evita el archivado de datos irrelevantes. Esto permite detectar la etapa de estabilidad en el proceso de biodegradación y se logra buscando, después de un tiempo de latencia asignado por el usuario y mediante un algoritmo, cuándo el incremento de presión deja de ser significativo.

La aplicación consta de tres ventanas principales, que se aprecian en la **Figura 3**. En el panel principal se tiene información general del desarrollo del experimento y control de paro. En las otras dos ventanas se visualizan de forma tabular y gráfica los valores registrados de cada reactor.

Fig. 3 Ventanas principales de programa: panel de control, gráfica de presiones y tabla de registro.

Análisis de costos

Con fines comparativos, en la Tabla 1 se desglosan los costos de los materiales empleados para la manufactura del equipo SABiA. No se incluye el software LabView, que tiene precios diversos dependiendo de quién lo compre y cómo lo haga.

En resumen los costos de materiales ascienden a aproximadamente \$1031 USD, lo cual es muy bajo, considerando los costos de equipos comerciales de esta naturaleza. Por supuesto a este costo aproximado habría que sumar los costos asociados a manufactura y diseño.

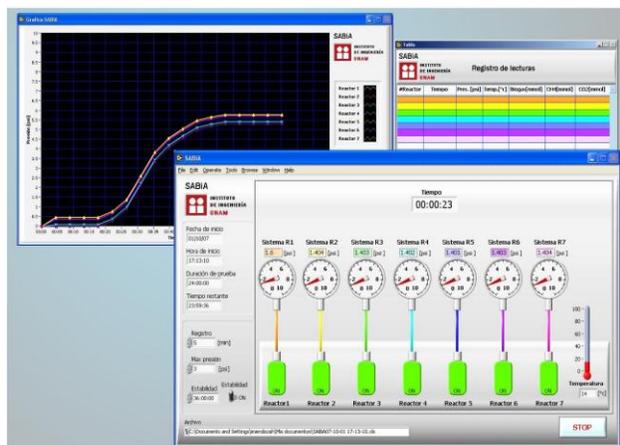
Tabla 1: Costos en USD de los materiales empleados para el desarrollo de SABiA

Componente	Costo \$ USD
NI-USB 6008	175
Transductor de presión Honeywell (7)	210
Transductor de temperatura	1
Electroválvulas Festo (7)	275
Racores y tubo flexible	200
Material de electrónica	100
Gabinete	70
TOTAL	1031

Pruebas experimentales del equipo

Aunque el equipo está generalmente pensado para determinar la biodegradabilidad anaerobia de algún compuesto o contaminante, también puede emplearse para verificar la producción de hidrógeno a partir del tratamiento de aguas residuales.

Para realizar una prueba se coloca un inóculo de algún lodo en particular en cada una de las botellas, o bien en la que se hayan seleccionado para la prueba, y se agrega el sustrato a biodegradar. Estas botellas son puestas en un agitador orbital dentro de una incubadora a temperatura controlada. El equipo entonces hace su tarea y despliega al usuario los resultados de la misma. Posteriormente, el usuario puede recuperar el archivo y leerlo en una hoja de cálculo o en algún otro programa de cómputo.





En la **Figura 4** se presenta el resultado de una de estas pruebas. Es interesante notar que en este caso se trató de distintos inóculos, por lo que era de esperarse que cada uno reaccionara con tiempos distintos. El equipo estaba programado para hacer una purga de biogás si éste rebasaba el valor de 1 psi, pues la producción de hidrógeno se inhibe si la presión es relativamente alta.

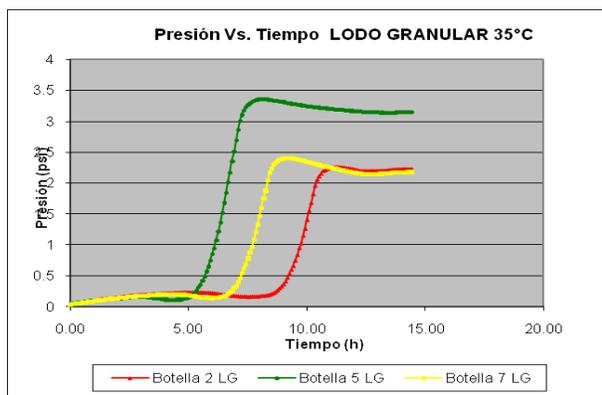


Fig. 4 Resultados de una prueba de producción de hidrógeno a partir de agua residual sintética.

Conclusiones

La aplicación práctica de los componentes del equipo SABiA permite establecer este tipo de sistema como un producto manufacturable, flexible, de bajo costo y fácil mantenimiento. Con ello se ofrece una solución con alto nivel de integración. Su desempeño y arquitectura tienen como principales características:

1. Monitoreo de presión en cada uno de los reactores de prueba se realiza en línea.
2. Control de las sobrepresiones causantes de inhibición en la producción de biogás.
3. Mejoramiento de las condiciones anaerobias del experimento
4. La disposición de los elementos de hardware dentro de un gabinete hace que se tenga una solución completa, portátil, y de fácil manejo y calibración.

Referencias

- [1] A.J. Guwy. "Equipment used for testing anaerobic biodegradability and activity", *Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol 3, pp.-131-139, 2004.
- [2] Müller, W.-R., I. Frommert, R. Jörg. "Standardized methods for anaerobic biodegradability testing", *Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol 3, pp.-141-158, 2004.
- [3] A. Rozzi, E. Remigi. "Methods of assessing microbial activity and inhibition under anaerobic conditions: a literatura review", *Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol 3, pp.-93-115, 2004.

Currículo corto de los autores

Alejandro Vargas es Ingeniero Mecánico Electricista egresado de la Universidad Nacional Autónoma de México en 1995. Obtuvo el grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica en 1999 y el Doctorado en Control Automático en 2002 de la misma Universidad. Desde 2004 es investigador de tiempo completo en el Instituto de Ingeniería de la UNAM

Ismael Mendoza es pasante de la carrera en Ingeniería Eléctrica-Electrónica en la Universidad Nacional Autónoma de México.

José Carlos Moreno es pasante de la carrera en Ingeniería Eléctrica-Electrónica en la Universidad Nacional Autónoma de México.

Bibliografía

- Aguilar; Doménech; Garrido. *Simulación Electrónica con PSPICE*. España: RA-MA, 1995.
- Aguilar. *Metodología de la programación*. México: McGraw-Hill, 1987.
- Ambríz. “Estudio y Aplicación de la Prueba de Biodegradabilidad Aerobia Rápida”. México: Facultad de Química. Tesis de licenciatura, UNAM. 1998.
- Angelidaki. ...et Al. “An Automatic System for simultaneous monitoring of gas evolution in multiple closed vessels”. Dinamarca: *Journal of Microbiological Methods* , pp. 93-100, No.33, 1998.
- Bentley. *Sistemas de Medición Principios y Aplicaciones*. 2ª.Ed. México: CECSA, 1993.
- Bitter; Mohiuddin; Nawrocki. *LabVIEW Advanced Programming Techniques*. E.U.A.: CRC Press, 2000.
- Buitrón; Moreno. “Influencia del Origen del Inoculo en la prueba de Biodegradabilidad Anaerobia”. México: Coord. Bioprocesos Ambientales, I.I., UNAM, 2002.
- Boylestad,; Nashelsky. *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. 8ª. Ed. México: Pearson Educación, 2003.
- Cardinale; Bookland; Cowan; Larson .”El significado de las pruebas de biodegradabilidad, y un ensayo recomendado para América Latina”. *XXV Congreso de AIDIS*. 1996.

- # Coughlin; Driscoll. *Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales*. 4ª. Ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., 1993.
- # Gartiser; Wallrabenstein; Stiene. “Assessment of several test methods for the determination of the anaerobic biodegradability of Polymers”. Alemania: *Journal of Enviromental Polymer Degradation*, Vol. 6, No.3, 1998.
- # Gregory. *Instrumentación Eléctrica y Sistemas de Medida*. España: Gustavo Gili S.A., 1984.
- # Guwy. “Equipment used for testing anaerobic biodegradability and activity”. Holanda: *Enviromental Science and Biotechnology*, 3 pp. 131-139, 2004.
- # Hamming. *Digital Filters*. 3ª Ed. E.U.A.:Prentice-Hall,1989.
- # Kuss; Young. “Method and Apparatus for Measuring Gas Flow Using Bubble Volume”. E.U.A.: United States Patent, 1992.
- # Lazcano-Arriola;... et Al. “Evaluación de la Biodegradabilidad de diferentes aguas residuales pretratadas con el método de Fenton”. México: Facultad de Química,2005.
- # Manuel Lázaro;... et Al. *Instrumentación Virtual*. México:Alfaomega,2002.
- # Manuel Lázaro; del Río Fernández. *LabVIEW 7.1 Programación Gráfica para el Control de Instrumentación*. España: Thomson, 2005.
- # Moreno; Buitrón. “Influencia del Origen del Inóculo en la prueba de Biodegradabilidad Anaerobia”. México: IIUNAM, 2002.

- # Moreno; Cruz; Buitrón “Influence os So/Xo ratio and medium composition on anaerobic biodegradability test”. E.U.A.:52nd *Purdue industrial Waste Conference*, Chapter 14, pp.125-133, 1997.
- # Moreno Andrade. *Influencia del origen del inóculo y de la relación inicial sustrato/microorganismo (So/Xo) en la prueba de biodegradabilidad anaerobia*. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas, UNAM. 2003
- # Nashelsky. *Fundamentos de Tecnología Digital*. 3ª.Ed. México: Limusa S.A. de C.V., 1993.
- # Pagga. “Testing biodegradability with standarized methods”. Alemania: *Chemosphere*, Vol.35, No.12, pp.2953-2972,1997.
- # Pallás Areny. *Adquisición y Distribución de Señales*. España: Marcombo, 1993.
- # Pastre; Maher. *Methodology for the digital Calibration of Analog Circuits and Systems*.Holanda: Springer,2006.
- # Pertence. *Amplificadores operacionales y filtros activos*. España: MacGraw-Hill, 1991.
- # Rozzi; Castellazzi; Speece. “Acetolclastic Methanogenic Activity Measurement by a Titration Bioassay”. E.U.A.: John Wiley& Sons, 2001.
- # Rozzi; Remigi. “Methods of assessing microbial activity and inhibition under anaerobic conditions: a literature review”. Holanda: *Enviromental Science and Biotechnology*, pp 93-115, 2004.
- # Salazar. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental “*Implementación de un sistema automatizado para la determinación de la biodegradabilidad aerobia y anaerobia*”. México: IIUNAM, 2006.

- # Shelton; Tiedje . “General Method for Determining Anaerobic Biodegradation Potential”. E.U.A: *Applied and Environmental Microbiology*, pp.850-857, Michigan State University,1984.

- # Sokolof. *Basic Concepts of LabVIEW 4*. E.U.A.: Prentice-Hall Inc., 1998.

- # Chen. *Passive, Active and Digital Filters*. E.U.A.:CRC Press,2005.

- # Wolf-Rudiger; Frommert; Jorg. “Standardized methods for anaerobic biodegradability testing”. Alemania: *Environmental Science and Biotechnology* , pp. 141-158, 2004.

- # Wolf; Smith. *Guía para Mediciones Electrónicas y Prácticas de Laboratorio*. 2ª.Ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., 1992.