



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería
Campo de Conocimiento (Ingeniería Ambiental)

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO
PARA LA DETERMINACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD
AEROBIA Y ANAEROBIA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA**

PRESENTA:

ING. MÓNICA SILVANA SALAZAR PLATA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. GERMÁN BUITRÓN MÉNDEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA
MÉXICO D.F. 2006

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

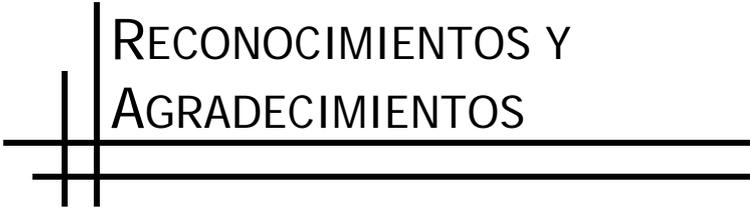
GRUPO TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES
COORDINACIONES DE BIOPROCESOS AMBIENTALES E INSTRUMENTACIÓN
INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM

JURADO:

PRESIDENTE: DR. VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO
VOCAL: DR. GERMÁN BUITRÓN MÉNDEZ
SECRETARIO: M. EN I. ESPERANZA RAMÍREZ CAMPEROS
1^{ER} SUPLENTE: M. EN I. LAURO SANTIAGO CRUZ
2^{DO} SUPLENTE: DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. GERMÁN BUITRÓN MÉNDEZ



RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

A la **UNAM**,

por su indudable prestigio y por
permitirme formar parte del
posgrado en ingeniería...

A **CONACYT** y **DGEP**,
por la beca otorgada,
apoyo indispensable para
la realización de estudios
de maestría...

Al **IINGEN**,

Y todo su personal,
por cada uno de los
momentos vividos durante
mi estancia en sus
instalaciones...

Al proyecto **DGAPA-UNAM**
(PAPIIT INI02005) por los
recursos financieros para el
desarrollo del tema...

Al **DR. GERMÁN BUITRÓN MÉNDEZ**,
por integrarme en su grupo de
investigación y sobre todo por creer
siempre en mí, como mujer,
ingeniera y ser humano...

Al **DR. VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO** y
a **LA M. EN I. ESPERANZA RAMÍREZ C.**,
miembros del comité tutorial, por su apoyo,
asesoría y aportaciones en este proyecto.

Al **M. EN I. LAURO SANTIAGO CRUZ**,
miembro del jurado y colaborador especial durante este proyecto,
por todo el tiempo, entusiasmo y apoyo durante la realización de este proyecto...

A la **DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ V.**,
miembro del jurado y profesora del
posgrado, por sus palabras de
aliento en cada momento.

A **CECILIA VALERA, ISRAEL NAVA, JUAN**
y los chicos de instrumentación, por la
disposición y la ayuda con la parte técnica
del equipo, mil gracias

A la Maestra **GLORIA MORENO**
Por el tiempo otorgado, apoyo y sobre
todo por ser una gran colaboradora de trabajo...

MUY
SINCERAMENTE...

Al **INGENIERO OSCAR ÁNGEL VIRUEGA HERNÁNDEZ †**

Con todo mi respecto, cariño y admiración a su memoria.

*Inge, no hay palabras suficientes para agradecerle todo lo que hizo por mí
y por que este equipo funcionara...*

A los compañeros, ahora buenos amigos:

- ◆ Maribel Quezada Cruz,
- ◆ Manuel J. Betancur B,
- ◆ Dafne González Alcaráz,
- ◆ Luis Rodrigo Cervantes Quiróz,
- ◆ Miguel Herrera,
- ◆ Aurelie Estival,
- ◆ Claudia Rangel,
- ◆ Francisco Velarde

Al **M. EN I. JUAN JAVIER CARRILLO SOSA**

Prof. por el apoyo, la motivación, la amistad,
por ser un gran maestro y en especial,
por creer en mí y decirme porqué.

Y no por última menos importante,
a mi Alma Mater, la **UAM**.

Por fortalecer en mi formación valores como
la persistencia y la integridad.

°

CON TODO MI CARÍÑO...

A mis padres.

Por su infinito apoyo, amor y confianza,
en todo lo que decido emprender y que
sin ellos sería imposible culminar...

Gracias nuevamente,

VÍCTOR y HORTENSIA

A mi hermana

Por sus picardías, por todo lo que he
aprendido de ella y por ser siempre
el apoyo objetivo en mi vida...

TE QUIERO MUCHO **LUCY**

A **Xico**...

Decidir ser el compañero de mi vida,
soportar mis atormentados demonios, y
frecuentes estados de locura requiere de
una gran inteligencia y, sobre todo,
mucho valentía...

¡¡¡TE AMO, CORAZÓN!!!

A **TÍ**...

Porque al pensarte me haces más fuerte
cada día, inevitablemente...

A mi abuelito,

SR. VÍCTOR MANUEL SALAZAR VELATTI

Por el cariño, el apoyo y por seguir aquí
para seguirle dando primicias....

A mis mejores amigos,

ALMA, PAULINA, ANDRÉS y FEDERICO

Por la amistad, por la solidaridad,
por el apoyo, siempre, mucho
más que moral...

A mi primo, el **ING. ARTURO HERNÁNDEZ PLATA**

Por la amistad, el apoyo (desde antes de la UAM hasta hoy), la confianza otorgada,
por ser un muy buen "jefe" y por toda la admiración que te tengo.

A la familia **SALAZAR – PLATA,**

Por estar ahí, por la diversidad y por lo que eso me hace ahora....

CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 Conceptos de bioprocesos	4
1.2.1 Biodegradación	4
1.2.2 Biodegradación aerobia	4
1.2.3 Biodegradación anaerobia	4
1.2.4 Biodegradabilidad	4
1.2.5 Pruebas de biodegradabilidad	5
1.3 El ambiente y las sustancias	5
1.4 La biodegradación en el ambiente	5
1.5 Pruebas de biodegradabilidad y su importancia	7
1.5.1 Etapas de una prueba de biodegradabilidad	9
1.5.2 Factores involucrados en una prueba de biodegradabilidad	10
1.5.2.1 Biológicos	10
1.5.2.2 Químicos	11
1.5.2.3 Físicoquímicos	11
1.5.2.4 Tecnológicos	11
1.6 Conceptos básicos de instrumentación y medición.	12
1.6.1 Exactitud y precisión	12
1.6.2 Sensibilidad	13
1.6.3 Repetibilidad	13
1.6.4 Reproducibilidad	13
1.7 Equipo y tecnología	14
1.8 Automatización de las pruebas	16
1.9 Aporte de este trabajo de tesis	16

1.10	Objetivos	17
1.10.1	General	17
1.10.2	Específicos	17

CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA **18**

2.1 Estrategia experimental **18**

2.2 Prueba de biodegradabilidad Anaerobia **19**

2.2.1	Estado inicial del sistema	19
2.2.2	Descripción del sistema	19
2.2.3	Variables	21
2.2.3.1	Variables de respuesta	21
2.2.3.2	Variables manipulables	22
2.2.4	Cuantificación del biogás	22
2.2.5	Operación del sistema	23
2.2.5.1	Datos iniciales y puesta en marcha	23
2.2.5.2	Operación del sistema	25
2.2.6	Desarrollo de una prueba	26
2.2.7	Experimentos planteados	27
2.2.7.1	Cálculos Previos	28
2.2.8	Validación y análisis estadístico del sistema	30
2.2.8.1	Límites de detección	30
2.2.8.2	Repetibilidad	30
2.2.8.3	Precisión	31

2.3 Sistema Aerobio **31**

2.3.1	Concepción del sistema	32
2.3.2	Variables	34
2.3.2.1	Variables de respuesta	34
2.3.2.2	Variables manipulables	34
2.3.3	Cuantificación del oxígeno	35
2.3.3.1	Reactor Aerobio	35
2.3.4	Inicialización y operación del sistema	37
2.3.4.1	Datos iniciales	37
2.3.4.2	Operación	37
2.3.5	Desarrollo de la prueba	39

2.3.6	Pruebas exploratorias	40
2.3.6.1	Con compensación de presión	40
2.3.6.2	Sin compensación de presión	40

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN **41**

3.1	Sistema Automatizado	41
3.2	Sistema Anaerobio	42
3.2.1	Esquema del sistema	42
3.2.2	Prueba de calibración	43
3.2.3	Relación $S_o/X_o = 0.1067$ mg DQO/ mg SSV	45
3.2.4	Relación $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV	46
3.2.4.1	Relación en fase gas / fase líquida = 50/200	46
3.2.4.2	Relación en fase gas / fase líquida = 100/150	50
3.2.4.3	Relación en fase gas / fase líquida = 150/100	53
3.2.5	Relación $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/1000 mg SSV	56
3.2.5.1	Relación en fase gas / fase líquida = 50/200	56
3.3	Discusión de resultados	59
3.3.1	Límites de detección del sistema	60
3.3.2	Repetibilidad de los resultados del sistema	61
3.3.3	Precisión del sistema	62
3.4	Sistema aerobio	63
3.4.1	Prueba de calibración	65
3.4.2	Prueba exploratoria sin compensación de presión	66
3.4.3	Prueba exploratoria con compensación de presión	68
3.4.4	Discusión de resultados	71

CAPÍTULO 4

PROBLEMAS Y SOLUCIONES **73**

4.1	Problemática en el desarrollo	73
4.2	Fugas	74
4.2.1	Reactores	74
4.2.2	Válvulas y conexiones	75
4.2.3	Calentamiento en el sistema	76

4.2.3.1	Disipadores de calor en la IAS	76
4.2.3.2	Configuración de válvulas multiplexoras	77
4.3	Detección de errores en el sistema	78
CAPÍTULO 5		
CONCLUSIONES		80
5.1	Conclusiones	80
5.2	Recomendaciones	81
REFERENCIAS		83
APÉNDICE I		
TÉCNICAS		88
AI.1	Determinación de sólidos suspendidos	88
AI.2	Preparación del medio mineral anaerobio	90
AI.3	Preparación del medio mineral aerobio	93
APÉNDICE II		
GRÁFICAS Y PANTALLAS		95
AII.1	Pantallas del sistema anaerobio relación $S_0/X_0=0.2134$ mg DQO/mg SSV en $F_{gas}/F_{liq}=50/200$	95
AII.2	Pantallas del sistema anaerobio relación $S_0/X_0=0.2134$ mg DQO/mg SSV en $F_{gas}/F_{liq}=100/150$	103
AII.3	Pantallas del sistema anaerobio relación $S_0/X_0=0.2134$ mg DQO/mg SSV en $F_{gas}/F_{liq}=150/100$	110
AII.4	Pantallas del sistema anaerobio relación $S_0/X_0=2.134$ mg DQO/mg SSV en $F_{gas}/F_{liq}=50/200$	118
APÉNDICE III		
COSTOS		126
AIII.1	Costos	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Etapas de una prueba de biodegradabilidad. Adaptada de Pagga (1997).	10
Figura 1.1	Diferencia entre precisión y exactitud. Adaptada de Posadas (2005).	13
Figura 2.1	Esquema de visualización de sistema anaerobio.	20
Figura 2.2	Curva formada con las presiones acumuladas generadas por el biogás.	22
Figura 2.3	Inicialización del sistema.	24
Figura 2.4	Pantalla de visualización del software del sistema anaerobio.	26
Figura 2.5	Principales requerimientos y desechos de los microorganismos aerobios.	32
Figura 2.6	Esquema de visualización de sistema aerobio.	33
Figura 2.7	Detalles del reactor diseñado para el sistema aerobio.	36
Figura 2.8	Pantalla de visualización del software del sistema aerobio.	38
Figura 3.1	Fotografía del sistema en operación.	42
Figura 3.2	Esquema detallado del sistema automatizado anaerobio.	43
Figura 3.3	Prueba de calibración realizada de manera manual en el sistema.	45
Figura 3.4	Pantalla de una prueba del experimento $S_o/X_o = 0.1067$ mg DQO/ mg SSV en una relación $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$ con un tiempo de muestreo de 1440 minutos (24 horas).	46
Figura 3.5	Pantalla en una prueba del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volúmenes en $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	47
Figura 3.6	Rapidez de producción de biogás promedio y desviación estándar del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	48
Figura 3.7	Temperatura promedio del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	49
Figura 3.8	Metano total promedio del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una relación $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	50
Figura 3.9	Pantalla generada en una de las pruebas del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volúmenes en $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	51
Figura 3.10	Rapidez de producción de biogás promedio y desviaciones estándar del experimento $S_o/X_o = 0.213.4$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volúmenes en $f_{gas}/F_{liq} = 100/150$	52
Figura 3.11	Temperatura promedio del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volúmenes en $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$.	52
Figura 3.12	Metano total promedio del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/mg SSV en una relación $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$	53

Figura 3.13	Pantalla generada en una de las pruebas del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/mg SSV en una relación de volúmenes en $F_{gas}/F_{liq} = 150/100$	54
Figura 3.14	Rapidez de producción de biogás promedio y desviaciones estándar del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volúmenes en $F_{gas}/F_{liq}=150/100$	55
Figura 3.15	Temperatura promedio del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/mg SSV en una relación de volúmenes en $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$	55
Figura 3.16	Metano total promedio del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/mg SSV en una relación $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$	56
Figura 3.17	Pantalla generada en una de las pruebas del experimento $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volúmenes en $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	57
Figura 3.18	Rapidez de producción de biogás promedio y desviaciones estándar del experimento $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/mg SSV en una relación de volúmenes en $f_{gas}/F_{liq}=50/200$	58
Figura 3.19	Temperatura promedio del experimento $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volúmenes en $f_{gas}/F_{liq} = 50/200$	58
Figura 3.20	Metano total promedio del experimento $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/ mg SSV en una relación $f_{gas}/F_{liq} = 50/200$	59
Figura 3.21	Metano recuperado para cada S_o/X_o en todos los experimentos	63
Figura 3.22	Esquema detallado del sistema automatizado aerobio	64
Figura 3.23	Prueba de calibración realizada de manera manual	65
Figura 3.24	Pantalla generada en la prueba $S_o/X_o = 0.534$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volumen $F_{gas}/F_{liq} = 125/100$ sin captura de aire	66
Figura 3.25	Gráfica con corrección de fórmula en la prueba $S_o/X_o = 0.534$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volumen $F_{gas}/F_{liq} = 125/100$ sin compensación de presión	67
Figura 3.26	Gráfica de la media de los decremento de presión en la prueba $S_o/X_o = 0.534$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volumen $F_{gas}/F_{liq} = 125/100$ sin compensación de presión	68
Figura 3.27	Pantalla generada en la prueba $S_o/X_o = 0.534$ mg DQO/1000 mg SSV en una relación de volumen $F_{gas}/F_{liq} = 125/100$ con captura de aire	69
Figura 3.28	Gráfica con corrección de fórmula en la prueba $S_o/X_o = 0.534$ mg DQO/1000 mg SSV en una relación de volumen $F_{gas}/F_{liq} = 125/100$ con compensación de presión	70
Figura 3.29	Gráfica de la media de los decremento de presión en la prueba $S_o/X_o = 0.534$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volumen $F_{gas}/F_{liq} = 125/100$ con compensación de presión	70
Figura 4.1	Tapa de reactor anaerobio de perfil con o-rings nuevos	74

Figura 4.2	Puntos de fuga arreglo de válvulas en los gabinetes del sistema	76
Figura 4.3	Ubicación de los disipadores de calor adicionales	77
Figura 4.4	Ventilador en gabinete del sistema aerobio	78
Figura 5.5	Organigrama para la detección de errores en el sistema	79
Figura AII.1	Presiones promedio del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	95
Figura AII.2	Metano total de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	96
Figura AII.3	Metano total promedio de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	96
Figura AII.4	Rapidez de producción de biogás de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.	97
Figura AII.5	Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	97
Figura AII.6	Pantalla del sistema anaerobio de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	98
Figura AII.7	Metano total de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	98
Figura AII.8	Metano total Presiones de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	99
Figura AII.9	Rapidez de producción de biogás de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	99
Figura AII.10	Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o= 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	100
Figura AII.11	Pantalla del sistema anaerobio de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	100
Figura AII.12	Metano total de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$	101
Figura AII.13	Metano total promedio de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	101
Figura AII.14	Rapidez de producción de biogás de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	102
Figura AII.15	Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	102
Figura AII.16	Presión total promedio del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$	103

Figura AII.17	Metano total de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$	103
Figura AII.18	Metano total promedio de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$	104
Figura AII.19	Rapidez de producción de biogás de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$	104
Figura AII.20	Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$	105
Figura AII.21	Pantalla de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$	105
Figura AII.22	Metano total de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$	106
Figura AII.23	Metano total promedio de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$	106
Figura AII.24	Rapidez de producción de metano de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$	107
Figura AII.25	Rapidez de producción de metano de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$	107
Figura AII.26	Pantalla de metano de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$	108
Figura AII.27	Metano total de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$	108
Figura AII.28	Metano total promedio de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$	109
Figura AII.29	Rapidez de producción de biogás de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$	109
Figura AII.30	Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 100/150$	110
Figura AII.31	Presión total promedio del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 150/100$	110
Figura AII.32	Metano total de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 150/100$	111
Figura AII.33	Metano total promedio de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 150/100$	111
Figura AII.34	Rapidez de producción de biogás de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 150/100$	112

Figura AII.35 Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 150/100$	112
Figura AII.36 Pantalla de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 150/100$	113
Figura AII.37 Metano total de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 150/100$	113
Figura AII.38 Metano total promedio de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 150/100$	114
Figura AII.39 Rapidez de la producción de biogás de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 150/100$	114
Figura AII.40 Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 150/100$	115
Figura AII.41 Pantalla de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 150/100$	115
Figura AII.42 Metano total de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 150/100$	116
Figura AII.43 Metano total promedio de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 150/100$	116
Figura AII.44 Rapidez de producción de biogás de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 150/100$	117
Figura AII.45 Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 150/100$	117
Figura AII.46 Presión total promedio del experimento $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	118
Figura AII.47 Metano total de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	118
Figura AII.48 Metano total promedio de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	119
Figura AII.49 Rapidez de producción de biogás de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	119
Figura AII.50 Rapidez de producción de biogás de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	120
Figura AII.51 Pantalla de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	120
Figura AII.52 Metano total de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$	121

Figura AII.53	Metano total promedio de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$ _____	121
Figura AII.54	Rapidez de producción de biogás de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$ _____	122
Figura AII.55	Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$ _____	122
Figura AII.56	Pantalla de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$ _____	123
Figura AII.57	Metano total de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$ _____	123
Figura AII.58	Metano total promedio de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$ _____	124
Figura AII.59	Rapidez de producción de biogás la corrida 3 del experimento $S_o/X_o= 2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$ _____	124
Figura AII.60	Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o= 2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq} = 50/200$ _____	125
Figura AIII.1	Cotización Challenge AER-208 (1ra parte) _____	128
Figura AIII.2	Cotización Challenge AER-208 (2da parte) _____	129

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Principales métodos usados para determinar la biodegradabilidad. _____	5
Tabla 1.2	Equipos comerciales utilizados para determinar la biodegradabilidad de las sustancias. _____	15
Tabla 2.1	Experimentos planteados. _____	28
Tabla 2.2	Cuadro descriptivo de las distintas pruebas anaerobias realizadas. _____	30
Tabla 3.1	Registro de presiones en la prueba de calibración en el sistema anaerobio. _____	44
Tabla 3.2	Coefficientes de cada experimento en sus distintas evaluaciones. _____	61
Tabla 3.3	Porcentajes de error en cada experimento. _____	62
Tabla AIII.1	Detalle de costos del sistema automatizado para la determinación de la biodegradabilidad aerobia y anaerobia _____	127

RESUMEN

Conocer la biodegradabilidad de las sustancias es uno de los aspectos más importantes para entender su comportamiento en el ambiente. Las pruebas de biodegradabilidad se realizan, para predecir de manera confiable los efectos que una sustancia antropogénica o xenobiótica causará en el ambiente. El problema generalizado de las diversas técnicas y métodos utilizados para las pruebas de biodegradabilidad, radica en su realización, principalmente, de manera manual. Esto, propicia errores en las lecturas y desfase en los tiempos de medición. Asimismo, una de las principales limitantes es que no hay un mismo método para la determinación de ambos tipos de biodegradabilidad, anaerobia y aerobia.

En este trabajo de investigación, se propuso y se ensambló un prototipo automatizado para la determinación de la biodegradabilidad (anaerobia y aerobia) por métodos manométricos. La automatización del sistema anaerobio, partió de una primera versión desarrollada por Moreno y Buitrón (1996) en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Con la finalidad de mejorar este sistema se adicionó, la evaluación de la repetibilidad, precisión y límites de detección del equipo. Se estudiaron 4 distintas relaciones de sustrato/microorganismo (S_0/X_0) variando las relaciones de volumen (F_{gas}/F_{liq}) en los reactores. En este caso, se encontró una repetibilidad del sistema con coeficientes de variación de 1.46 a 4.83%, mejorando los reportados de la primera versión. La precisión del nuevo sistema es de 4%, con un porcentaje de metano recuperado de hasta 88.3% y con detección en relaciones S_0/X_0 mayores a 0.1067 mg DQO/mg SSV. En el caso del sistema aerobio se comprobó el funcionamiento a partir de pruebas exploratorias, con y sin captura de aire. Los coeficientes de variación obtenidos fueron de 3.2 y 14.5% respectivamente, resultados alentadores para esta primera versión aerobia.

Adicionalmente, se elaboró un organigrama que permite la fácil detección de problemas y soluciones presentados durante el desarrollo de la parte experimental.



ABSTRACT

Measuring substance's biodegradability is one of the most important aspects for determining its behavior in the environment. Biodegradability tests are performed for reliably predicting the effects that anthropogenic or xenobiotic substances will cause on environment. The problem presented by the diversity of techniques and methods used for biodegradability testing, is in the mainly manual way in which test's are carried out, this can cause errors in measurement's reading and mismatch of measurement timing. Also, one of the main limitations, is the nonexistence of a method for determining both biodegradability types; anaerobic and aerobic.

The present work describes the design, assembly and testing of a prototype automated device for determining biodegradability (both anaerobic and aerobic) by manometric means. The automation of the anaerobic system, was based on one first version developed by Moreno and Buitrón (1996) in the Engineering Institute of the UNAM, amongst other improvements; the evaluation of repeatability, the precision and the detection limits of the device, where determined. Four different substrate/microorganism (S_0/X_0) relations where studied, by changing the Gas to Liquid volume relations (F_{gas}/F_{liq}) in the reactors. In this case, the system's repeatability was found to have a variation coefficient from 1.46 to 4.83%, thus improving over the earlier version. The new system has a precision of 4%, with a percentage of recovered methane of up to 88.3% and with detection in S_0/X_0 relations greater than 0.1067 COD mg/ VSS mg. Functioning of the aerobic system was verified by exploratory tests, with and without air capture. The variation coefficients obtained are of 3.2 and 14.5% respectively, encouraging results for this first Aerobic version.

Additionally, an organizational chart for the detection of problems and its solving is presented in the part pertaining to the experimental development.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Hoy en día se generan cada vez más productos y sustancias químicas, debido al desarrollo industrial, principalmente de la industria química. Siempre que estas sustancias o productos entran en contacto con el ambiente, hay una reacción que puede ser dañina en mayor o menor medida al medio ambiente en un corto o largo plazo.

Esto, ha motivado el estudio de los mecanismos de degradación o remoción de las sustancias en los sistemas naturales, particularmente por medios biológicos.

En este capítulo, se presenta una reseña de cómo surgen éstos estudios, se particulariza sobre el tema de la biodegradación de las sustancias y por ende, la importancia de las pruebas de biodegradabilidad, así como los factores que frecuentemente las afectan.

Al final del capítulo, un resumen de los equipos, y de las técnicas usadas actualmente, pretenden poner en contexto al lector en el tema; además de remarcar el aporte de este trabajo.

1.2 Conceptos de bioprocesos

1.2.1 Biodegradación

La biodegradación, transformación de una sustancia por microorganismos (bacterias, hongos, protozoarios, etcétera). De manera más formal, la biodegradación es definida como el proceso de degradación microbiana de sustancias orgánicas complejas en sustancias más sencillas, y ésta, puede ser primaria o última. La biodegradación primaria se refiere a la transformación de la sustancia original. Finalmente, la biodegradación última o completa, se refiere al proceso mediante el cual se lleva a cabo la transformación total de la sustancia orgánica compleja en CO₂, CH₄ y constituyentes del material celular (biomasa) (Cardinale, 1996).

1.2.2 Biodegradación aerobia

La biodegradación aerobia, es una degradación microbiana llevada a cabo en presencia de oxígeno. Sus principales productos son: bióxido de carbono, agua (debido a la reducción de oxígeno molecular) y biomasa microbiana (Ambríz-Rivas, 1998; Albert, 1995).

1.2.3 Biodegradación anaerobia

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 fuente de energía). En la biodegradabilidad anaerobia, los principales productos de la biodegradación anaerobia son el metano (CH₄), bióxido de Carbono (CO₂) y trazas de ácido sulfhídrico (H₂S) (Buitrón, 2002b; Ambríz-Rivas, 1998).

1.2.4 Biodegradabilidad

Se define como la capacidad que tiene una sustancia de ser transformada en compuesto más sencillos por acción de los microorganismos (Albert, 1995).

1.2.5 Pruebas de biodegradabilidad

Las pruebas de biodegradabilidad son un proceso de simulación de la biodegradación que ocurre en el ambiente de manera natural. Existen distintos métodos para llevar a cabo las pruebas de biodegradabilidad. En general, consiste en la incubación de la sustancia problema en un medio mineral con los microorganismos más convenientes (aerobios o anaerobios) bajo condiciones ambientales controladas, durante un lapso determinado de tiempo (aproximadamente 28 días) y mantener el seguimiento de la biodegradación usando la técnica analítica más adecuada (Žgajnar y Zargorc-Končan, 1999a).

1.3 El ambiente y las sustancias

Es un hecho que, el contacto de todas las sustancias con el medio ambiente, provoca un efecto en el mismo, y que el uso indiscriminado de sustancias antropogénicas o xenobióticas han provocado daños al medio ambiente, por ello, que cada vez es más importante conocer las propiedades y características de cada una de ellas. Por lo tanto, conocer la biodegradabilidad de las sustancias es uno de los aspectos más importantes de su comportamiento en el ambiente. La biodegradabilidad, tiene un papel clave, simplemente, por que una sustancia degradable no causará ningún riesgo a largo plazo en el ambiente (Pagga, 1997; Lefaux *et al*, 2004).

Para los usuarios responsables de sustancias químicas son necesarios los datos de biodegradación para decidir, si una sustancia puede ser tratada de forma biológica o fisicoquímica en una planta de tratamiento de aguas residuales o no (Pagga, 1997).

1.4 La biodegradación en el ambiente

Un principio importante en los ecosistemas naturales con frecuencia extremadamente complejos, como arroyos o suelos, pero también en los sistemas técnicos, como una planta de tratamiento de aguas residuales o de composta, es el ciclo de las sustancias. En estos ciclos el papel de los elementos tales como: el carbón, nitrógeno, fósforo para el crecimiento de plantas y animales; y, como parte muy importante de este rol, es el que juegan, los organismos

degradadores. Los organismos degradadores, transforman la biomasa disponible de los productores (plantas) y de los consumidores (animales), así como sus productos de excreción; además de las pérdidas líquidas y sólidas de seres humanos, en productos de degradación de bajo peso molecular (catabolitos), tales como: el bióxido de carbono (CO_2), el amonio (NH_4^+) y el agua (Pagga, 1997).

Los microorganismos degradadores, en especial bacterias y hongos, desarrollaron hace millones de años rutas bioquímicas para la degradación de sustancias naturales, que utilizan como alimento. De esta manera, muchas sustancias antropogénicas que han pasado al ambiente en grandes cantidades desde el principio de la industrialización, son estructuralmente similares a las sustancias naturales y son, por lo tanto, eficientemente degradadas. Esto es evidente, en la alta eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales biológicas para aguas residuales químicas. Sin embargo, hay sustancias naturales difíciles de degradar, como son: la lignina o quitina; y, en el caso de las sustancias antropogénicas, casi todos los plásticos, pinturas y pigmentos. Las sustancias completamente ajenas a la naturaleza son usualmente difíciles de degradar, y de hecho, así debe ser, por el uso para el que son concebidas originalmente (Pagga, 1997).

De una manera muy sencilla a principios del siglo pasado, los procesos naturales de degradación se han copiado en unidades de ingeniería para tratar residuos sólidos y aguas residuales. Las plantas de tratamiento biológicas de agua residual con tanques de lodos activados y torres de digestión para la estabilización de lodos anaerobios, son los procesos sencillos, más eficientes para la depuración de aguas residuales; en éstas instalaciones ocurren los mismos procesos de biodegradación que en el ambiente natural pero, bajo condiciones optimizadas (Pagga, 1997).

Conocer detalladamente los procesos de degradación de las sustancias en los ecosistemas naturales y técnicos es muy importante para mejorar su función, o prevenir daños (Struijs *et al*, 1995; OECD, 1995; Zagjnar y Zagorc-Končan, 1999a; Pagga, 1997; Mijaylova *et al*, 1999; Ahtiainen *et al*, 2002; Pagga *et al*, 2003). Por lo tanto, con la intención de obtener una predicción confiable de la biodegradabilidad de las sustancias, productos, aguas residuales y/o

residuos sólidos en el ambiente, se realizan pruebas de biodegradabilidad bajo condiciones de laboratorio.

1.5 Pruebas de biodegradabilidad y su importancia

Actualmente, se realizan una gran variedad de pruebas para la determinación de la biodegradabilidad aerobia y anaerobia en el tratamiento de efluentes industriales. Sin embargo, no existe una estandarización de las mismas (Pagga, 1997).

En la variedad de pruebas, se ve reflejada la diversidad de parámetros utilizados para determinar la degradación de una sustancia, esto a su vez, genera una vasta cantidad de errores experimentales y de laboratorio. Por ejemplo, la habilidad en la lectura o medición, si es una medición directa o indirecta de la degradación de la sustancia, la vida útil de los reactivos, la correcta instalación del equipo utilizado y no menos importante, los errores humanos durante su desarrollo. Como ya se mencionó, las pruebas de biodegradabilidad proporcionan una idea de la forma y el tiempo en que se llevará a cabo la degradación de un compuesto en específico, ya sea por medios naturales o artificiales. Se considera que una sustancia es rápidamente biodegradable cuando tiene un porcentaje de degradación mínimo del 60 por ciento en un lapso no mayor a los 28 días (Ahtiainen *et al*, 2003; Žgajnar y Zagorc-Končan, 1996; Cardinale *et al*, 1996; Struijs y Van Den Berg, 1995).

En concreto, el principio de todas las pruebas que existen 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, simulando el proceso de natural de degradación (Žgajnar y Zagorc-Končan, 1996; Cardinale *et al*, 1996, Lefaux *et al*, 2004). Al igual que muchas de las situaciones ambientales pueden ser modeladas y así como muchos factores pueden influir en los resultados de las pruebas, no es posible definir, un verdadero método. La reproducibilidad de los resultados de las pruebas usando diferentes métodos o condiciones o usando siempre los mismos métodos de prueba, pero diferente inóculo pueden ser bajos y obteniendo con ello

Tabla 1.1 Principales métodos usados para determinar la biodegradabilidad.

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 NV, y adsorbentes • $C_{COD} = 10-40$ mg/L 	Inóculos con baja concentración de bacterias
ISO 9888 OECD 302B	Método Zahn-Wellens			<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos NVO y solubles • $C_{COD} = [50-400]$ 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 	Información adicional de compuestos solubles por la medición de remoción de COD
ISO 14593	Head Space CO ₂	CO ₂ producido a) Después de acidificar la fase gaseosa. b) Después de alcalinizar en forma de CID		<ul style="list-style-type: none"> • Sustancias volátiles 	
ISO 9408 OECD301 C OECD 302 C	Respirométrica	DBO en un respirómetro cerrado	Comparación de la DBO con el OD teóricos o la DQO	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos solubles e insolubles • $C_{compuesto} = 100$ mg/L ó • $C_{ODT} = 100$ mg/L 	
ISO 10708 ^b	Botellas cerradas en 2 fases	El O ₂ proviene de fase gas. Oxígeno medido con un electrodo			
ISO 10707 OECD 301D	Botellas cerradas	Botellas de DBO ₅ . El O ₂ proviene fase acuosa	<ul style="list-style-type: none"> • C bajas ≤ 2 mg/L • Compuestos volátiles y tóxicos 	Inóculos con baja concentración	
OECD 301F	respirometría manométrica	Medición continua del consumo de oxígeno	Determinación de las cinéticas de degradación	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos solubles, insolubles y volátiles 	Análisis adicionales para determinar la BP. Alto potencial de biodegradación, usado para aclimatación de un inóculo
ISO 9887 OECD 302A	Prueba de lodo 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 	
ISO 11733 OECD 303	Ensayo de simulación de lodos activados	COD o DQO en el influente, efluente y en un blanco	Cálculo de la BU. TP = 12 semanas	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos NVO, solubles • y/o dispersos, • $C_{COD} = [10-20]$ mg/L 	
ISO11734	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"> • $C = [20-100]$ mgCI/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 específicos	<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 agitación	Comparación COD al inicio y al final. TP = 28 a 60 días	<ul style="list-style-type: none"> • $C_{COD} = [2-40]$ 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

Adaptado de Pagga, 1997; OECD, 2006

diferentes resultados. Normalmente, la prueba de un material o sustancia cualquiera fácilmente o difícilmente biodegradable produciría resultados similares, en contraste con sustancias que son moderadamente biodegradables y necesitan por ejemplo, un tipo de bacteria especial o un largo periodo de adaptación, que producirían diferentes resultados (Pagga, 1997).

En la tabla 1.1 se presenta un resumen de los principales métodos usados para determinar la biodegradabilidad de las sustancias en distintos ambientes especificando los parámetros medidos, su evaluación y algunas observaciones importantes sobre cada uno de ellos.

Pero la pregunta que surge aquí, después de todo ¿Cómo saber cuando empieza y cuando termina la biodegradación de una sustancia, y que tipo de factores se encuentran involucrados durante el desarrollo de la misma?

1.5.1 Etapas de una prueba de biodegradabilidad

La biodegradación de una sustancia, generalmente es expresada en un nivel de porcentaje de degradación, el cual es determinado en una curva de degradación. Por ejemplo, la figura 1, muestra una curva de degradación usando dietilenglicol en una prueba estática con lodos activados, donde es posible distinguir las tres etapas o fases principales de una prueba de biodegradabilidad, siguientes:

- la fase de aclimatación o phase lag (día 0 al 5), donde ocurre la adaptación del inóculo a la sustancia de prueba
- la fase de degradación (día 5 al 12), en la cual las bacterias usan la sustancia como alimento y crecen
- la fase de meseta (día 12 al final de la pruebas al día 15), en la cual la degradación ha finalizado.

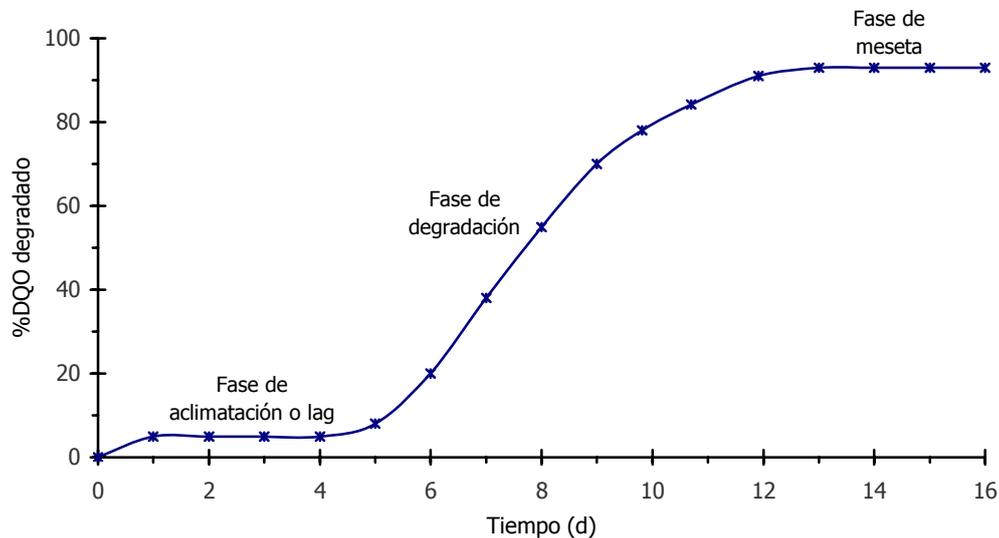


Figura 1.1 Etapas de una prueba de biodegradabilidad. Adaptada de Pagga (1997).

En una prueba de biodegradabilidad, el tiempo de cada fase es específico para cada compuesto, es decir, los tiempos de degradación varían de acuerdo al tipo de compuesto a degradar. El nivel de degradación de DQO es el promedio de la fase de la meseta, en este ejemplo es de 90 al 100% (Pagga, 1997).

1.5.2 Factores involucrados en una prueba de biodegradabilidad

En las pruebas de biodegradabilidad de una sustancia, existen una variedad de factores que afectan el nivel de degradación, éstos pueden dividirse en el siguiente orden de importancia:

- factores biológicos,
- factores químicos,
- factores fisicoquímicos, y,
- los factores tecnológicos.

1.5.2.1 Biológicos

Los factores de tipo biológico que pueden afectar las pruebas de biodegradabilidad son:

- *Origen del inóculo*, la fuente del inóculo determina la existencia de diferencias en la poblaciones de bacterias y su adaptación al sustrato a degradar (Struijs y Van Den Berg, 1995; OECD, 1995; Moreno-Andrade, 2003).
- *Composición del medio*, y concentración de alimentos inorgánicos, especialmente nitrógeno, fósforo, elementos traza y la capacidad amortiguadora del medio (OECD 1995; Pagga, 1997; Buitrón, 2002).

1.5.2.2 Químicos

Dentro de los factores químicos que pueden afectar las pruebas de biodegradabilidad se incluyen: el largo de la cadena del compuesto a degradar, la clase, número y posición de los constituyentes en la molécula a degradar, entre otros (Ambríz-Rivas, 1998).

1.5.2.3 Fisicoquímicos

Son considerados como factores fisicoquímicos parámetros tales como: la temperatura, grado de dispersión del compuesto en el medio, pH, oxígeno disuelto (OD), la solubilidad y/o volatilidad de sustancia a tratar, los cuales determinan su biodisponibilidad y su eliminación abiótica del agua (Pagga, 1997; Ambríz-Rivas, 1998).

1.5.2.4 Tecnológicos

Dentro de los factores tecnológicos, son consideradas:

- *La concentración de la sustancia a probar*, que debe ser lo suficientemente alta para el método analítico elegido, pero lo suficientemente bajo en el caso de sustancias tóxicas o cuando las concentraciones reales en el ambiente deben ser simuladas (Pagga, 1997).
- La presencia o ausencia de otra sustancia degradable en el mismo medio, para los procesos cometabólicos (Pagga, 1997).

- *Las condiciones y propiedades de los sistemas de prueba*, tal como volumen y forma del envase, frascos abiertas o cerradas, temperatura de incubación, modo y velocidad de mezclado, abastecimiento de oxígeno, equipo utilizado, tiempo de duración de la prueba, entre otros (Pagga, 1997).
- *También es considerado como factor tecnológico la relación S_0/X_0* , debido a que en las pruebas de biodegradabilidad una concentración inicial del sustrato (S_0) es puesta en contacto con la cantidad inicial de microorganismos (X_0) a este último también se le llama inóculo; el parámetro S_0 , representa la fuente de carbono y energía usada para la biosíntesis, y X_0 son los microorganismos que consumen esa fuente de carbono y energía (Moreno-Andrade, 2003).

1.6 Conceptos básicos de instrumentación y medición.

1.6.1 Exactitud y precisión

De acuerdo a los Métodos estándar para análisis de agua y aguas residuales (APHA, 1998), la *exactitud* es una combinación de la tendencia y la precisión de un procedimiento analítico, que refleja la proximidad de un valor medido a un valor verdadero. Sin embargo, enfocando esta definición más hacia la parte instrumental de este proyecto, la exactitud de un instrumento es: la calidad que caracteriza la capacidad de un instrumento de medición para proporcionar señales (magnitudes) aproximadas al valor verdadero de la cantidad medida (Sydenham, 1982). Mientras que, la *precisión* es una medida de la proximidad con la cual los múltiples análisis de una muestra dada coinciden con el resto. La precisión se determina por la replica de los análisis de un estándar estable, o por el análisis de adiciones conocidas a muestras (APHA, 1998).

La exactitud implica normalmente precisión, pero la afirmación inversa no es cierta, ya que pueden existir aparatos muy precisos que posean poca exactitud. En general, se puede decir que es más fácil conocer la precisión de un aparato que su exactitud (Posadas, 2005). Hacer una medición, en realidad, es como tirar al blanco. La figura 1.1 se presenta la interpretación, sobre una diana (tiro al blanco), de las diferencias significativas entre precisión y exactitud.

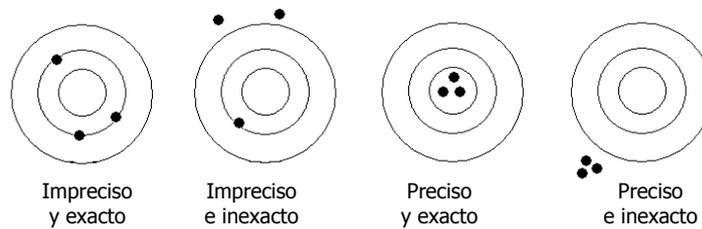


Figura 1.1 Diferencia entre precisión y exactitud. Adaptada de Posadas (2005).

1.6.2 Sensibilidad

La sensibilidad de un aparato es el valor mínimo de la magnitud que es capaz de medir. Normalmente, se admite que la sensibilidad de una aparato viene indicada por el valor de la división más pequeña de la escala de medida (Posadas, 2005).

1.6.3 Repetibilidad

La capacidad de un sistema de medición para indicar el mismo valor con aplicaciones repetidas, pero independientes, de la misma entrada, se conoce como repetibilidad del instrumento de medición (Figliola, 2003). Es decir, proporciona una idea de la variación en la medición, que se espera cuando un método es aplicado por el mismo operario, mismo equipo, mismo laboratorio, con la misma muestra y en un corto periodo (diferentes series, análisis por duplicado o triplicado) (Diario Oficial CE, 1998; Sánchez, 2004; Van Laar *et al*, 2006).

1.6.4 Reproducibilidad

El término de reproducibilidad, cuando se menciona en las especificaciones del instrumento se refiere a los resultados de pruebas de repetibilidad separadas. Representa la variación en la medición que se obtiene cuando un método es aplicado a la misma muestra por operarios en distintos laboratorios, y evidentemente, tiene un valor más amplio (Diario Oficial CE, 1998; Sánchez, 2004; Van Laar *et al*, 2006). Las cifras de reproducibilidad de un instrumento que proporciona el fabricante se deben basar en múltiples pruebas de repetibilidad (réplicas) realizadas en diferentes laboratorios sobre una sola unidad (Figliola, 2003).

1.7 Equipo y tecnología

Como ya se mencionó, a partir de las necesidades del conocimiento de la degradación de las sustancias, se han desarrollado diversas técnicas y equipos para la medición de la biodegradabilidad, siempre tratando de estandarizar la técnica y la obtención de mejores resultados. Estas pruebas también pueden ser usadas modificando ligeramente su versión original, por ejemplo, usando suspensiones de composta como inóculo y un medio inorgánico con una alta capacidad amortiguadora y de nutrientes. Sin embargo, todas estas pruebas tienen la desventaja de no ser representativas de la composición ambiental de la vida real (Pagga *et al*, 1995).

Para la medición de la biodegradación, las pruebas pueden ser clasificada en dos tipos principales: medición directa de la concentración inicial y medición indirecta de la biotransformación del componente original (consumo de oxígeno, producción de bióxido de carbono (CO₂), cambios en la concentración del carbono orgánico disuelto (COD), etcétera)(OECD, 1995).

Las mediciones directas pueden cuantificar la desaparición de los componentes originales y no su mineralización, y no provee ninguna información de los posibles intermediarios o metabolitos. Estos métodos también son caros en realización, tiempo de consumo y no pueden ser automatizados, ésta es la razón, de por qué los métodos indirectos de biodegradación son más comúnmente usados y estandarizados (Žgajnar y Zagorc-Končan, 1999a).

Algo distinguible en la literatura es que en las pruebas de biodegradabilidad estandarizadas, se explica la técnica y el manejo de los resultados, sin embargo, no hay una estricta recomendación sobre los equipos utilizados. En la siguiente tabla, 2.2 se muestran algunos de los equipos utilizados en la medición parámetros, así como el método de operación de cada uno, su sensibilidad y algunos comentarios adicionales.

Tabla 1.2 Equipos comerciales utilizados para determinar la biodegradabilidad de las sustancias.

Equipo	Parámetro de medición	Método de operación	Sensibilidad	Rango de T	Comentarios adicionales
Atago Co. GVT-10	CO ₂	Determinación de vol. de CO ₂ calculado de la relación PV	0 - 0.5 MPa	0 - 40°C	<ul style="list-style-type: none"> Especial para medir CO₂ en latas de refresco T necesaria de muestras de 1 a 25 °C durante la prueba.
Fourier Systems DT039	CO ₂	Absorción de radiación infrarroja	0 - 5000 ppm	25 °C±5	<ul style="list-style-type: none"> RH = 5 - 95% NC TR = 2 minutos Medición en terrarios, respiración de insectos, reacciones químicas y de fermentación.
INTEC Controls CTS-M20	CO ₂	Sensor Infrarrojo ND	0 - 5000 ppm	5 a 40°C	<ul style="list-style-type: none"> RH = 0 - 99 % NC No Condensante Monitoreo continuo en AI VU del sensor = 14 Años
Manning Systems Inc. GM-1 GM-4 GM-10	CO ₂	Sensor Infrarrojo	0 - 50000 ppm	Hasta - 50° F	<ul style="list-style-type: none"> Medición de CO₂ en AI Apto para cervecerías, vinaterías, procesadoras de alimentos y granjas de hongos Conexión a tableros de alarma automática.
Ocean Optics FCO2-R	CO ₂	Molécula fluorescente	0-100 % (Sensibilidad de 0.003%)	hasta 120°C	<ul style="list-style-type: none"> Medición por medio de un cable de fibra óptica Alta resistencia termomecánica Sensibilidad al pH
Texas Instruments 9GS	CO ₂	Sensor de Radiación Infrarroja ND	0-5% 0-25%	0 a 50°C	<ul style="list-style-type: none"> Sensor Integral de O₂ Niveles de CO₂ en AI
Avisala GMM220	CO ₂	Sensor de Infrarrojos ND	0 - 10000 ppm	-20 a 60°C	<ul style="list-style-type: none"> RH = 100% NC, en tablero 85% Sensores intercambiables
Columbus Instruments ER-10	O ₂ CO ₂	Análisis de Gases	NE	NE	<ul style="list-style-type: none"> Mide respiración de suelos, composta, AR y lodo Medición de 1 a 10 muestras en un rango de volumen de 50ml a 10L.
Columbus Instruments Respirometro en línea Micro-Oxymax	CO ₂	Análisis de Gases	NE	NE	<ul style="list-style-type: none"> Mediciones constantes en línea con registro diario Apto para control de procesos Especialmente para AR
Columbus Instruments Respirometro Micro-Oxymax	O ₂ CO ₂ CH ₄ CO H ₂ S H ₂ NO ₂	Sensor de gases para medir cambios en la concentración de fases gaseosas, producción y consumo de los gases	NE	NE	<ul style="list-style-type: none"> Medición de respiración bacteriana, biodegradación, respiración de lodos, DBO₅, biotoxicidad, respiración de AR, lodos y suelos.
Columbus Instruments Medidor Portátil de Gases	O ₂ CO ₂ CH ₄	Analizador Infrarrojo de gases y CE de combustible para medición de O ₂	0 - 100% ppm	NE	<ul style="list-style-type: none"> Portátil en la medición simultánea de O₂/CO₂/CH₄. Apto para gases de composta y rellenos sanitarios VU medidor de O₂ = 5 años VU sensor de CO₂ = SD

AI= Ambientes interiores
AR = Aguas residuales
RH = Rango de humedad
NC = No condensante

ND = No disperso
NE = No Especificada
PV = Presión - Volumen
SD= Sin definir

TR = Tiempo de respuesta
T = Temperatura
VU = Vida útil

1.8 Automatización de las pruebas

Actualmente, hay una amplia variedad de métodos disponibles para determinar exactamente la degradación de materiales en el ambiente. En general, estos métodos están basados en la medición indirecta, como el consumo de oxígeno, la cantidad de bióxido de carbono producido, o el incremento de la biomasa (Calmon *et al*, 2000).

En la variedad de pruebas, se ve reflejada la diversidad de parámetros utilizados para determinar la degradación de una sustancia, así como los factores involucrados y, la generación de errores experimentales durante la medición o análisis de las muestras. Los sistemas automatizados son más reproducibles, baratos y más compactos. Es por ello, que las mediciones automatizadas son una ventaja, sobre las pruebas manuales (Lefaux *et al*, 2004).

1.9 Aporte de este trabajo de tesis

La prueba de la biodegradación funciona normalmente por 28 días, pero se puede prolongar o parar dependiendo de la anticipación de la fase de meseta (Lefaux *et al*, 2004). Precisamente, una de las ventajas de automatizar el sistema, es evitar las pérdidas de biogás que ocurren en los sistemas manuales y sistematizar un proceso que puede durar meses (Buitrón, 2002).

El aporte de este trabajo reside en el desarrollo de un equipo automatizado para la determinación de la degradación aerobia y anaerobia, se presenta una guía para su operación, los resultados y el análisis de los mismos. Como parte complementaria de este trabajo, se presenta un diagrama de flujo de los problemas y de las soluciones presentadas durante su desarrollo.

Por último pero no menos importante, las ventajas del equipo, partiendo de la idea de que, los sistemas automatizados son más reproducibles, baratos y más compactos; éstos podrían ser también usados para medir la biodegradabilidad de otras sustancias, tales como aceites y detergentes, etcétera (Calmon *et al*, 2000).

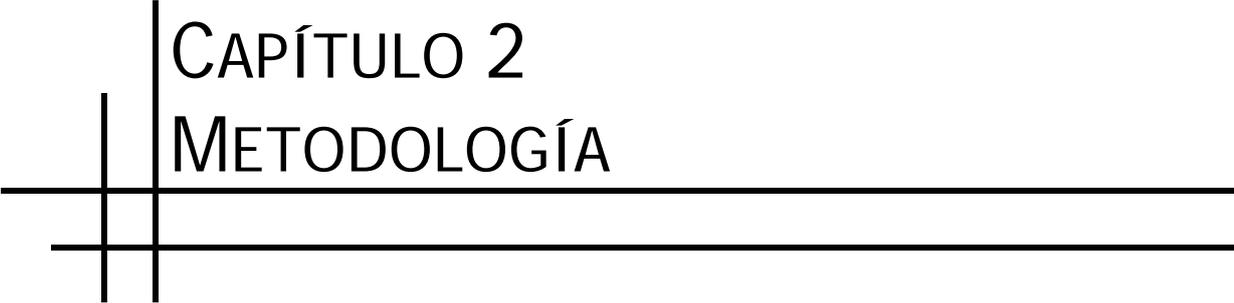
1.10 Objetivos

1.10.1 General

Implementar un sistema automatizado para la determinación de la biodegradabilidad anaerobia y aerobia.

1.10.2 Específicos

- Ensamblar un prototipo de un equipo automatizado y de fácil manejo.
- Ensamblar un equipo para la determinación de la biodegradación anaerobia por métodos manométricos, evaluando su repetibilidad, precisión y límites de detección.
- Construir una primera versión del equipo para la determinación de la biodegradabilidad aerobia por métodos manométricos y comprobar su funcionamiento.



CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2.1 Estrategia experimental

El desarrollo experimental de este proyecto se divide en dos partes, la parte anaerobia y la parte aerobia. Durante el presente capítulo se presenta el desarrollo de ambos sistemas, cada uno de ellos por separado y se explican cuáles son las pruebas que se realizaron para comprobar su funcionamiento.

A partir de una primera versión de un dispositivo automatizado anaerobio, se presenta el estado inicial del sistema anaerobio con una breve descripción del mismo, las variables manejadas, la cuantificación del biogás y la operación del sistema, todo esto como la parte teórica y operacional del sistema.

En cuanto a la parte experimental anaerobia, se explica cómo se lleva a cabo el montaje de una prueba, la planificación de los experimentos realizados, la evaluación y el análisis estadístico del sistema.

En el caso del sistema aerobio, se presenta la concepción del sistema, las variables manejadas, la cuantificación del oxígeno, la inicialización y operación, el desarrollo de una prueba y el planteamiento de las pruebas exploratorias realizadas en el sistema.

2.2 Prueba de biodegradabilidad Anaerobia

Para la prueba de biodegradabilidad anaerobia se desarrolló un dispositivo automatizado, basado en un método manométrico que fue desarrollado por Moreno y Buitrón (1996) en el Instituto de Ingeniería, por ello se mencionaran más adelante las características del dispositivo y los detalles de optimización en su operación.

2.2.1 Estado inicial del sistema

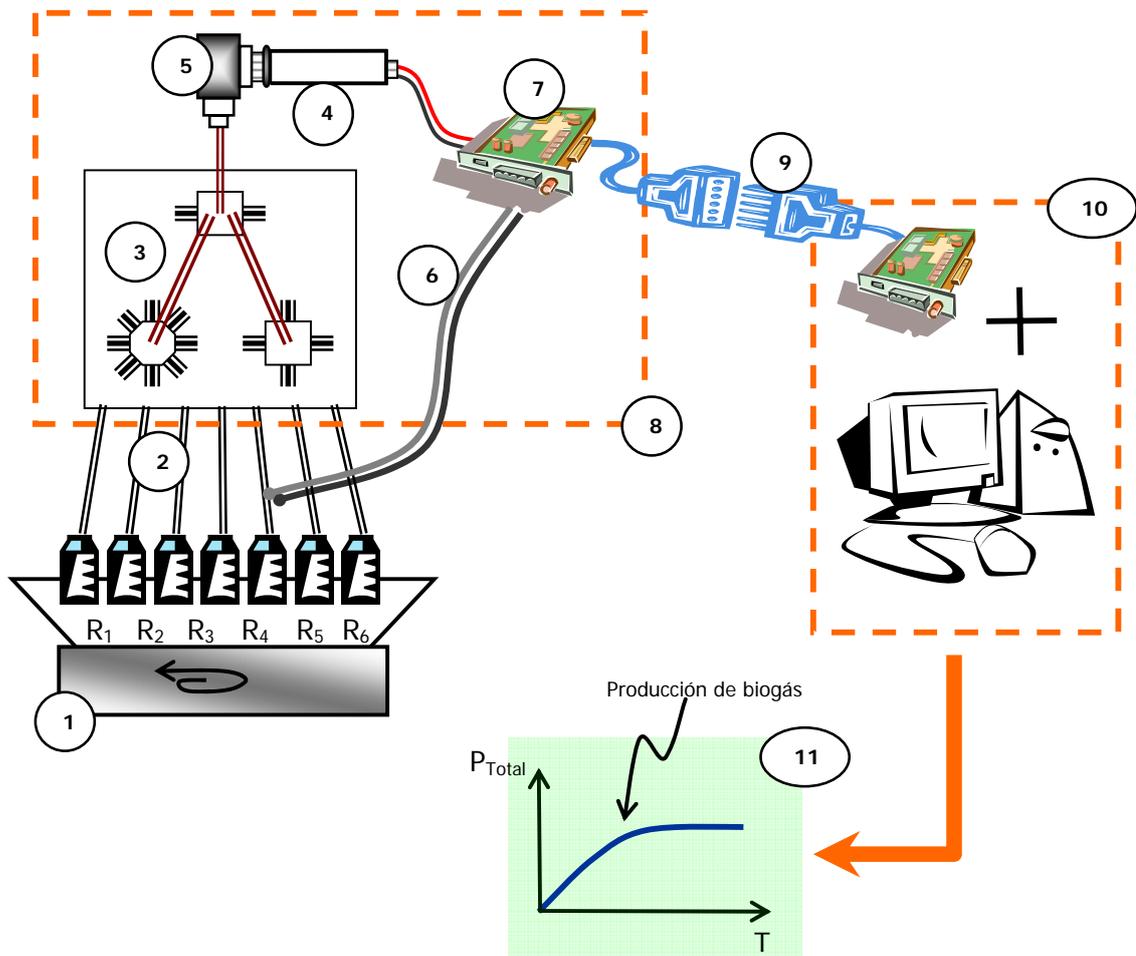
El dispositivo automatizado anaerobio, basado en un método manométrico, se encontraba dentro de las instalaciones del edificio 5 del Instituto de Ingeniería en el área de Bioprocesos Ambientales. La última versión del sistema contaba una mejor presentación en el arreglo de válvulas y una primera versión de un software realizado en LabView[®], desde la instalación de estas novedades, no se habían realizado pruebas de funcionamiento.

2.2.2 Descripción del sistema

El sistema está constituido por una computadora personal marca Acer-Aspire[®], los accesorios necesarios para su manejo (monitor, teclado, ratón, y cables de conexión) y un gabinete metálico en donde se encontraba un arreglo de válvulas solenoides. Este sistema utiliza como interfaces adicionales dos tarjetas, una de acondicionamiento de las señales de medición y control, y otra de adquisición de datos.

El gabinete o parte de medición del sistema, está capacitado para el monitoreo de 7 reactores en línea con la PC por medio de un software, basado en el lenguaje de programación LabView[®]. El monitoreo de los reactores, se realiza por medio de un arreglo de válvulas multiplexoras solenoides; cada reactor en agitación produce biogás, cuando se acciona una válvula, permiten el paso del gas hacia un medidor de presión con un intervalo de medición de 0.0 a 15.0 psi (lb/plg²). Posteriormente, una válvula solenoide de presión por medio de una interfase de acondicionamiento de señales (IAS) registra la presión medida en ese momento en el reactor, ésta envía el dato (señal) a la tarjeta de adquisición de datos (TAD) que se encuentra dentro de la PC.

Finalmente, el programa muestra el valor de la presión, la temperatura registrada por un sensor 0 a 100°C, y el equivalente de milimoles de biogás (metano y bióxido de carbono). En la figura 2.1 se muestra un esquema detallado del sistema.



1. Reactores sobre agitador orbital; 2. Mangueras de unión entre reactores y válvulas multiplexoras; 3. Válvulas multiplexoras solenoides; 4. Transductor de presión positiva; 5. Válvula solenoide actuadora de presión positiva; 6. Sensor de temperatura; 7. Interfase de acondicionamiento de señales (IAS); 8. Gabinete con arreglo de válvulas solenoides y la IAS; 9. Conector para la IAS y la Tarjeta de adquisición de datos (TAD); 10. Computadora Personal (PC) con la TAD; 11. Gráfica representativa de la presión total generada en un reactor monitoreado.

Figura 2.1 Esquema de visualización de sistema anaerobio.

Se utilizaron como reactores frascos graduados de vidrio de borosilicato con una capacidad de 250 mL, con rosca y tapa con rosca de la marca KAVALIER[®]. 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. Sin ser considerada parte del sistema, pero de gran importancia, fue utilizada una incubadora PRECISION[®] modelo 5EM, para mantener la temperatura de los reactores constante; de igual manera, un agitador orbital LABE LINE INSTRUMENTS[®], modelo 4626, fue utilizado para favorecer el contacto entre el sustrato y la biomasa.

Debe mencionarse que, la TAD, PCI-6024E de NATIONAL INSTRUMENTS[®], tiene la capacidad para manejar desde 7 hasta 18 señales, es decir que, puede ampliarse el número de reactores a monitorear. Asimismo, cuenta con un convertidor analógico de aproximaciones sucesivas, de 12 bits de resolución y con la capacidad de adquirir 200,000 muestras por segundo, además, de 2 canales de conversión analógico digital y 8 entradas/salidas digitales.

El cable de conexión entre la TAD y la IAS, modelo MD-685 contiene 34 pins de comunicación, también de NATIONAL INSTRUMENTS[®]. La IAS, contiene multiplexores digitales que permiten ampliar la capacidad de manejo de circuitos digitales de la TAD, también cuenta con circuitos de acoplamiento óptico, para el aislamiento de la PC con respecto a la IAS, además, de etapas de potencia que son necesarias en el manejo de las válvulas solenoides.

2.2.3 Variables

Como en todo proceso intervienen distintos tipos de variables (Gutiérrez, 2004), para el caso de este proceso, se plantearon dos tipos de variables, la de respuesta y las manipulables.

2.2.3.1 Variables de respuesta

Como variable de respuesta, fue utilizado el incremento de presión, esto como indicador de la producción de biogás en cada reactor. En el siguiente tema, se explica como se cuantifica el biogás producido.

2.2.3.2 Variables manipulables

Como variables manipulables, se utilizaron la relación sustrato – microorganismos (S_0/X_0), en conjunto con la relación fase gas – fase líquida (F_{gas}/F_{liq}), ya que se encuentran directamente vinculadas con las concentraciones y volúmenes probados.

2.2.4 Cuantificación del biogás

El biogás producido por los microorganismos se cuantifica a través del monitoreo de los incrementos de presión en cada reactor, en un tiempo de muestreo fijado previamente por el usuario.

El muestreo se realiza de manera automática y el valor de presión se guarda en la memoria. A continuación se abre la válvula y se libera el gas, de esta forma, se capturan los incrementos de presión y el sistema se mantiene prácticamente en la presión atmosférica. Cada vez que el sistema realiza el muestreo en un reactor, al registrar la presión generada en el mismo reactor, se resta la presión atmosférica, para obtener la presión real en el reactor. Al realizar la suma de estas presiones, se obtiene la curva de presión total que es producida por el biogás. En la figura 2.2, se muestra una gráfica que representa la sumatoria que genera la curva de la presión total.

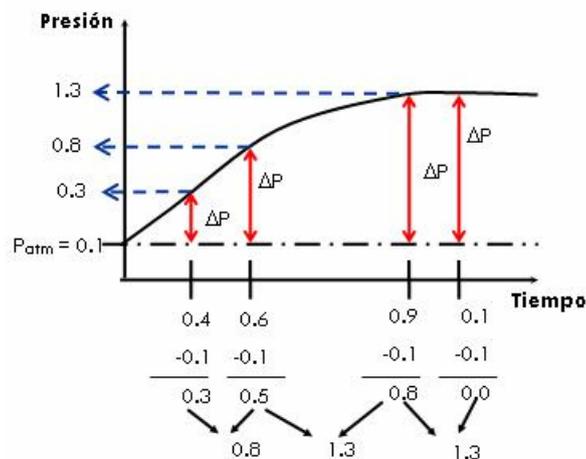


Figura 2.2 Curva formada con las presiones acumuladas generadas por el biogás.

Es importante mencionar que, con la purga de la línea se compensa la presión, y se obtiene una medición sin interferencias, así se evita una presión elevada que provoque una fuga y/o una inhibición de la producción de biogás por producto. Esto es parte de la originalidad del sistema propuesto.

El software del sistema, estima el número de moles de biogás a partir de la ecuación de los gases ideales y determina una proporción aproximada de sus principales componentes, que como ya se mencionó anteriormente son CH_4 y CO_2 . Es importante mencionar que el sistema, mantiene un registro de los datos obtenidos durante el monitoreo de los reactores y que la estimación del número de moles, está predeterminada por el usuario.

2.2.5 Operación del sistema

2.2.5.1 Datos iniciales y puesta en marcha

El sistema requiere de algunos datos iniciales para el registro del archivo, esto permite un reporte completo durante y al final de la prueba. Los datos iniciales que solicita el sistema, son los siguientes:

- fecha, hora de inicio de la prueba
- datos del operador,
- número de reactores por monitorear
- tiempo de duración de la prueba,
- volumen total de los reactores,
- volumen contenido en las mangueras,
- volumen del líquido en los reactores,
- porcentaje teórico de metano (valor típicamente usado, 66%),
- duración de la prueba ,
- tiempo de muestreo (tiempo al que se leerá la presión generada en cada uno de los reactores),
- nombre del archivo, y ruta de ubicación del archivo que registrará la producción del biogás.

La figura 2.3, es un diagrama de flujo que explica cómo es la introducción de estos datos al sistema.

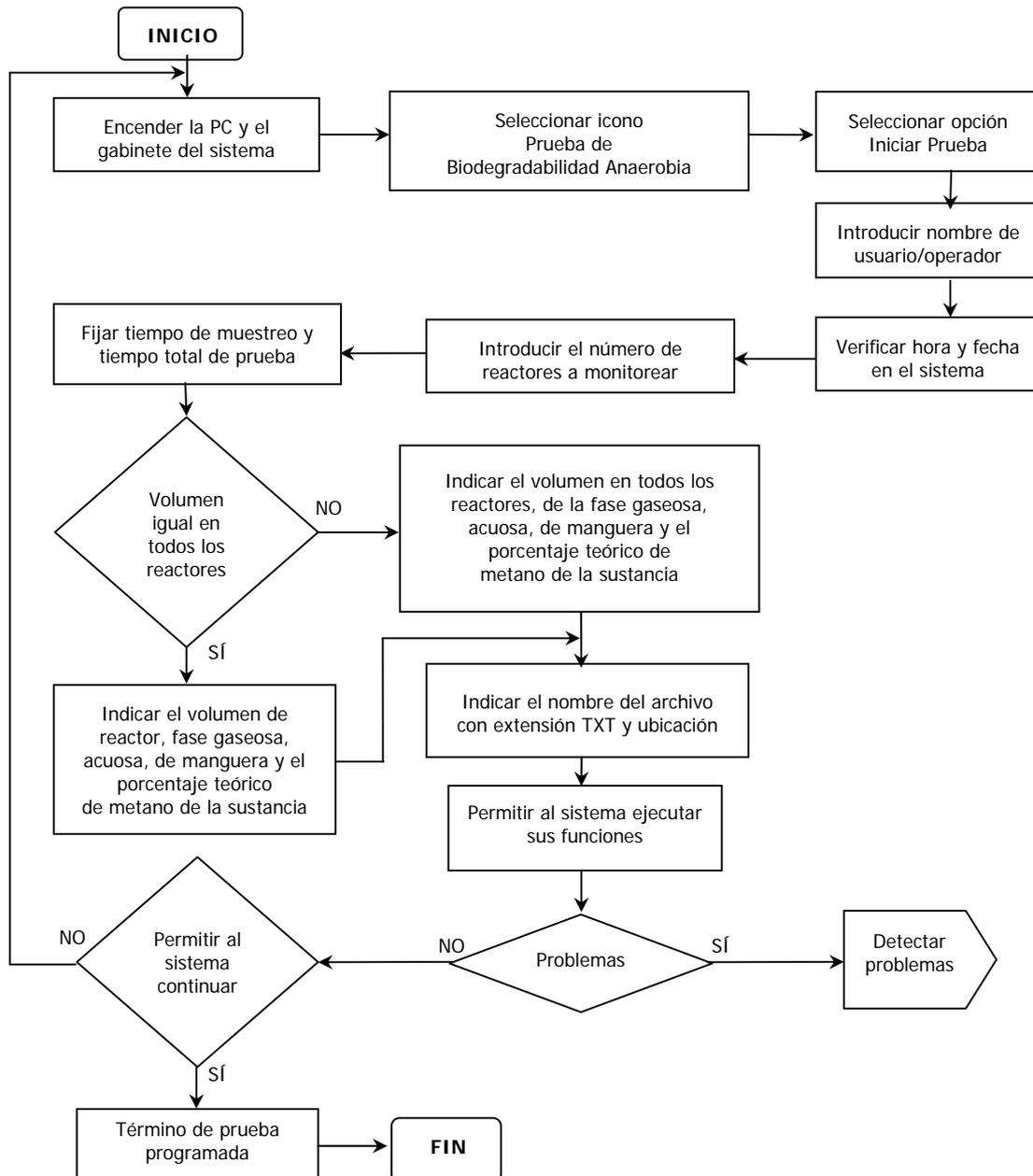


Figura 2.3 Inicialización del sistema.

2.2.5.2 Operación del sistema

Una vez introducidos los datos requeridos, comienza la operación del sistema, en la cual se visualiza el comportamiento de cada reactor, esto incluye:

- una animación de los reactores al momento del muestreo
- temperatura
- nombre del operador
- fecha y hora de inicio de la prueba
- hora del último muestreo registrado
- fecha actual
- tiempo de duración y, el que falta para terminar la prueba
- tiempo de muestreo
- número de reactores monitoreados
- nombre del archivo y, ubicación del archivo de registro de los datos de monitoreo
- presión instantánea y total, generada en cada reactor
- temperatura de exposición de cada reactor
- milimoles de biogás de cada reactor, y, de sus componentes principales, metano (CH₄) y bióxido de carbono (CO₂),
- un botón para detener la prueba en caso de ser necesario, y
- un espacio donde se observa la curva de las presiones totales generada en los reactores monitoreados indicando la escala, fecha y hora

En la figura 2.4 se muestra la pantalla de visualización del software del dispositivo sin prueba en ejecución, en ella pueden verse las ventanas de comunicación de cada uno de los datos antes mencionados.

Todos los datos generados durante la operación del sistema, son registrados en un archivo que puede ser transportado y manejado sin problema en EXCEL[®] para un análisis más detallado de los resultados.

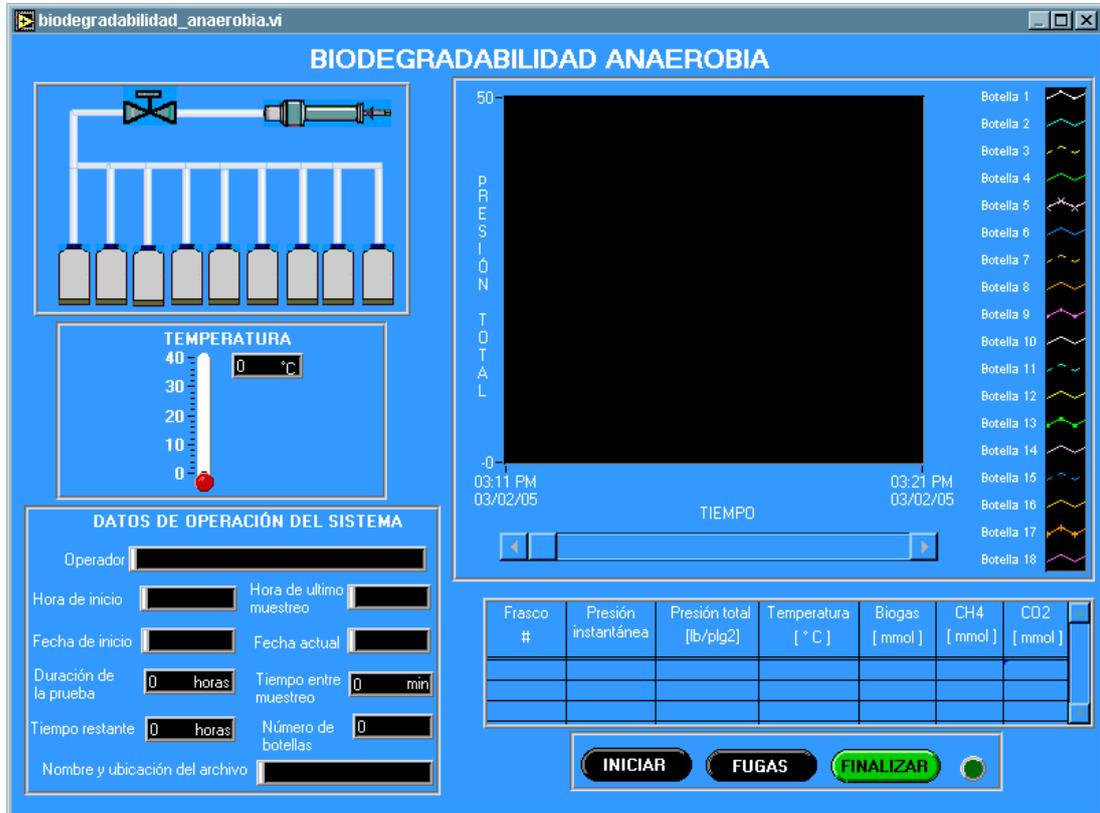


Figura 2.4 Pantalla de visualización del software del sistema anaerobio.

2.2.6 Desarrollo de una prueba

Para la puesta en marcha de una prueba, dentro de cada reactor se conformó una solución con los siguientes componentes:

- Glucosa, utilizado como sustrato, debido a su conocida facilidad de degradación y características. La solución de glucosa se preparó con Glucosa monohidratada ($C_6H_{12}O_6 \cdot H_2O$).
- Medio mineral, para favorecer una vía metabólica completamente metanogénica, se utilizó el medio de nutrientes según Balch, et al (1979), sin los compuestos con sulfatos y adicionando resazurina como indicador de contaminación por oxígeno (Apéndice A1.2).

- como inóculo utilizado para éstas pruebas, se utilizó biomasa anaerobia, donada por la planta de tratamiento de aguas residuales de la Cervecería Moctezuma, en Toluca, México.
- Y, agua reducida para completar el volumen requerido (Moreno-Andrade, 2003).

En los reactores, se inocularon 10 mL de medio mineral, más las cantidades necesarias de biomasa y sustrato, y en todos los casos, para completar los volúmenes requeridos se utilizó el agua reducida. Una vez preparados los reactores, se colocaron en una incubadora a una temperatura de $37 \pm 2^\circ\text{C}$. Para favorecer el contacto entre la biomasa y el sustrato se mantuvo una agitación constante de 150 rpm. Una vez finalizada la preparación de los reactores, cada uno fue conectado a una válvula de manera independiente en el gabinete del sistema en el que se encuentra el arreglo de válvulas solenoides y se inicializa el sistema, como ya ha sido explicado en el tema anterior.

Las cantidades de cada uno de los componentes en los reactores, dependieron directamente del ensayo S_0/X_0 en su respectiva relación fase_{gas}/fase_{liquida} a ensayar. Para la determinación de la concentración de biomasa se utilizó la técnica de determinación de sólidos, de acuerdo a la APHA (1998), que encuentra ubicada en el Apéndice A1.1

2.2.7 Experimentos planteados

Para cumplir con los objetivos mencionados en el capítulo 1, se plantearon tres relaciones de sustrato-microorganismo, S_0/X_0 , en conjunto con tres relaciones distintas de volumen ($F_{\text{gas}}/F_{\text{liq}}$). La variación de estas relaciones en conjunto, permite la localización de los límites de detección y la repetibilidad del sistema. Con la variación de las relaciones de S_0/X_0 , se determinaron los límites de detección. Con la variación en la relación de volumen y los ensayos realizados por triplicado se determinó la repetibilidad del sistema.

Se utilizaron tres distintas relaciones S_0/X_0 , la concentración de biomasa se mantuvo constante durante todos los experimentos, 1000 mg/L de SSV; variando así, únicamente la

concentración de sustrato, 100, 200 y 2000 mg/L de glucosa, que equivalen a 106.7, 213.4 y, 2134 mg/L de DQO.

Se fijaron tres relaciones de volumen, $F_{\text{gas}}/ F_{\text{liq}}$: 50/200, 100/150 y 150/100, siempre respetando la concentración de cada uno de los componentes. La tabla 2.1 muestra los experimentos planteados, para fines prácticos las relaciones serán reportadas en mg DQO / mg SSV de aquí en adelante.

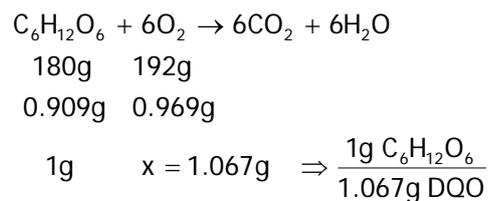
Tabla 2.1 Experimentos planteados.

Relaciones S_o/X_o $\left[\frac{\text{mg DQO}}{\text{mg SSV}} \right]$	Relaciones $F_{\text{gas}}/ F_{\text{liq}}$	Tiempo de muestreo
0.1067	50/200 ; 100/150 ; 150/100	90 minutos
0.2134	50/200 ; 100/150 ; 150/100	90 minutos
2.1340	50/200	180 minutos

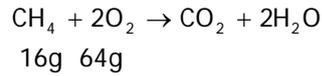
2.2.7.1 Cálculos Previos

Una vez conocidas las S_o/X_o y las $F_{\text{gas}}/ F_{\text{liq}}$ a ensayar, es necesario conocer las equivalencias entre glucosa, DQO y metano.

Como primer paso, para conocer cuantos gramos de DQO equivalen a la glucosa, se planteó la siguiente reacción:



Para conocer cuantos moles de metano equivalen a 1 g de DQO, se planteó y resolvió la siguiente reacción:



$$\frac{64\text{g O}_2}{16\text{g CH}_4} = \frac{4\text{g DQO}}{1\text{g CH}_4} = \frac{1\text{g DQO}}{0.25\text{g CH}_4}$$

Es decir, 1g de DQO equivale a 0.25g de CH₄

$$\frac{0.25\text{g CH}_4}{1\text{g DQO}} \cdot \left(\frac{1\text{ mol CH}_4}{16\text{g CH}_4} \right) = \frac{0.01563\text{ moles CH}_4}{1\text{g DQO}}$$

Es decir, **1g de DQO equivale a 0.01563 moles de CH₄**

Conociendo la equivalencia de gramos de DQO y los moles de metano teóricos, se realizaron los siguientes cálculos, para determinar la producción teórica de metano, tomado como base la fase líquida de los reactores, puesto que es ahí donde se conocen las condiciones del experimento.

$$\text{Experimento: } \frac{200 \text{ mg Glucosa monohidratada/L}}{1000 \text{ mg SSV/L}} = \frac{213.4 \text{ mg DQO/L}}{1000 \text{ mg SSV/L}} \text{ en una } \frac{F_{\text{gas}}}{F_{\text{liq}}} = \frac{50 \text{ mL}}{200 \text{ mL}}$$

$$200\text{mL en } F_{\text{liq}} \cdot \left(\frac{200 \text{ mg C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}}{1000 \text{ mL}} \right) \cdot \left(\frac{0.909\text{g C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}{1\text{g C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}} \right) \cdot \left(\frac{1\text{g}}{1000 \text{ mg}} \right) = 0.03636 \text{ g C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$$

$$0.03636 \text{ g C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \cdot \left(\frac{1.067 \text{ g DQO}}{1\text{g C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} \right) \cdot \left(\frac{0.01563 \text{ moles CH}_4}{1\text{g DQO}} \right) = 6.064 \times 10^{-4} \text{ moles CH}_4 = 0.6064 \text{ mmol CH}_4$$

De la misma manera, se realiza el cálculo para cada una de las relaciones de S₀/X₀ en sus respectivas combinaciones. En la tabla 2.2 se muestran los milimoles de metano teóricos para cada experimento.

Tabla 2.2 Cuadro descriptivo de las distintas pruebas anaerobias realizadas.

Relaciones S_0/X_0 $\left[\frac{\text{mg DQO}}{\text{mg SSV}} \right]$	Relaciones $F_{\text{gas}}/ F_{\text{liq}}$	CH ₄ teórico (mmol)
0.1067	50/200	0.3032
	100/150	0.2274
	150/100	0.1516
0.2134	50/200	0.6064
	100/150	0.4548
	150/100	0.3032
2.134	50/200	6.0638

2.2.8 Validación y análisis estadístico del sistema

Para mostrar el correcto funcionamiento del sistema, fue necesario hacer una validación del sistema. Esta validación está dividida en tres partes: límites de detección, reproducibilidad y precisión.

2.2.8.1 Límites de detección

Debido a la importancia de implantar un sistema automatizado y para conocer los límites de detección del sistema, se variaron las relaciones S_0/X_0 , en combinación con las variaciones de los volúmenes, $F_{\text{gas}}/ F_{\text{liq}}$.

En este caso no existe un cálculo definido para determinar el límite de detección del sistema, por lo que en este trabajo su determinación es meramente empírica.

2.2.8.2 Repetibilidad

Para verificar la reproducibilidad de las lecturas por el sistema, se monitorearon continuamente 7 reactores, por prueba ensayada. Es importante recordar que, cada experimento está conformado por tres ensayos bajo las mismas condiciones.

La repetibilidad será determinada por la desviación estándar, expresada como el coeficiente de variación debido a su facilidad para comparar los datos registrados por el sistema y a su vez aquellos que se pueden obtener posteriormente (Van Laar *et al*, 2006).

2.2.8.3 Precisión

Como se mencionó en el capítulo 1, la precisión está determinada por la réplica de análisis de un estándar estable (APHA, 1998) y conociendo los moles de metano teóricos para cada experimento, se puede determinar el porcentaje de error, definido como:

$$\%Error = \left(\frac{\text{Valor teórico} - \text{Valor experimental}}{\text{Valor teórico}} \right) \cdot 100$$

$$\%Error = \left(\frac{\text{Moles CH}_4 \text{ teóricos} - \text{Moles CH}_4 \text{ Experimentales}}{\text{Moles CH}_4 \text{ teóricos}} \right) \cdot 100$$

Debido a la composición del medio mineral (ausente de sulfatos que favorecen una ruta metabólica completamente metanogénica), es posible estimar un porcentaje teórico de metano del 66% para los cálculos necesarios en la parte experimental de esta tesis.

2.3 Sistema Aerobio

Los microorganismos aerobios para cumplir su ruta metabólica, requieren de oxígeno y de una fuente de carbono como proveedores de energía, y desechan como productos principales agua (H₂O) y bióxido de carbono (CO₂), la figura 2.5 se representa mejor esta pequeña explicación.

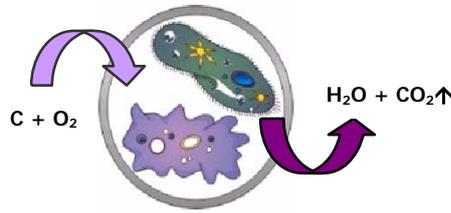


Figura 2.5 Principales requerimientos y desechos de los microorganismos aerobios.

En el caso específico de la prueba de biodegradabilidad aerobia, el oxígeno que requieren los microorganismos para su consumo es tomado del interior del reactor, que incluye tanto el oxígeno disuelto (OD) en la fase acuosa, como el oxígeno en la fase gaseosa (aire en el espacio libre del reactor), y para asegurar un intercambio entre ambas fases es necesaria una agitación constante a una velocidad moderada (120 RPM).

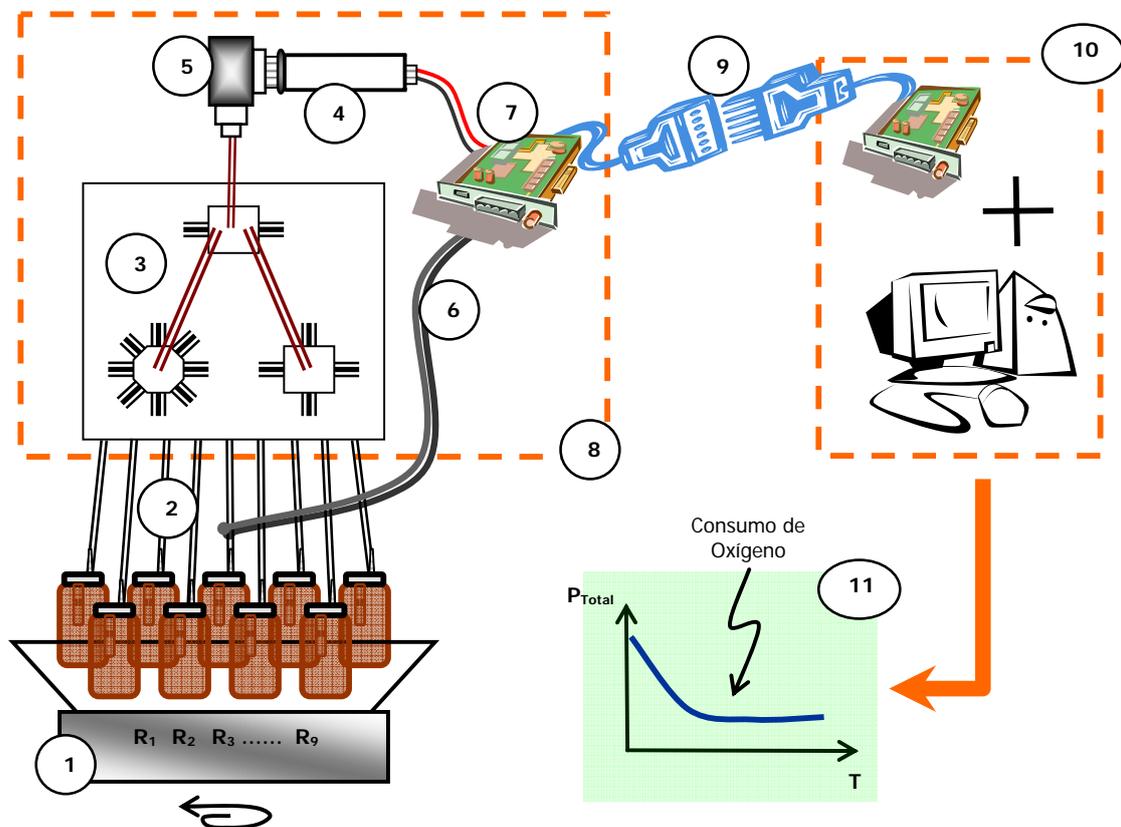
2.3.1 Concepción del sistema

El desarrollo de la prueba de biodegradabilidad aerobia se encuentra basada en un método actual en la determinación de la DBO (OXITOP® y OXIDIRECT® de LOVIBOND®) y en un método manométrico, que relaciona el cambio de presión causado por el consumo de oxígeno de los microorganismos en la muestra analizada, al tiempo que el bióxido de carbono (CO₂) producido por los microorganismos reacciona con el hidróxido de potasio (KOH) colocado en un depósito dentro del mismo reactor.

El dispositivo aerobio, está constituido por la misma computadora personal del sistema anaerobio, aunque cuenta con un gabinete distinto, debido a la diferencia con el transductor de presión negativa o de vacío y la válvula solenoide actuadora de vacío, un esquema del sistema se muestra en la figura 2.6

El dispositivo está capacitado para el monitoreo de 9 reactores, en línea con la PC que comparte con el sistema anaerobio, por medio de un software. Así mismo, cuenta con un arreglo de válvulas solenoides, un transductor de presión, en este caso de vacío de 30" de Hg a 0 psi (CZ-07356-10 de Cole Palmer®), un sensor de temperatura de 0 a 100°C, una válvula

actuadora de presiones negativas, un agitador orbital, una Interfase de acondicionamiento de señales (IAS) y una tarjeta de adquisición de datos (TAD). La TAD también tiene la capacidad para manejar desde 7 hasta 18 señales, es decir que, puede ampliarse el número de reactores a monitorear, cuenta con un convertor analógico de aproximaciones sucesivas, de 12 bits de resolución y con la capacidad de adquirir 200,000 muestras por segundo, y 2 canales de conversión digital analógica, más 8 entradas/salidas digitales.



1. Reactores sobre agitador orbital; 2. Mangueras de unión entre reactores y válvulas multiplexoras; 3. Válvulas multiplexoras solenoides; 4. Transductor de presión negativa o de vacío; 5. Válvula solenoide actuadora de vacío; 6. Sensor de temperatura; 7. Interfase de acondicionamiento de señales (IAS); 8. Gabinete con arreglo de válvulas solenoides y la IAS; 9. Conector para la IAS y la Tarjeta de adquisición de datos (TAD); 10. Computadora Personal (PC) con la TAD; 11. Gráfica representativa del decremento de presión generado en un reactor monitoreado.

Figura 2.6 Esquema de visualización de sistema aerobio.

El cable de conexión, entre la TAD y la IAS es otro componente que comparten ambos sistemas. La IAS contiene multiplexores digitales que permiten ampliar la capacidad de manejo de circuitos digitales de la TAD, también cuenta con circuitos de acoplamiento óptico, para el aislamiento de la PC con respecto a la IAS, además, de etapas de potencia que son necesarias en el manejo de las válvulas solenoides.

El programa de monitoreo de la prueba de biodegradabilidad aerobia, también está basado en un lenguaje gráfico que, igual que en el sistema anaerobio permite el control de la prueba por medio de ventanas de introducción de datos iniciales y durante la operación del sistema.

2.3.2 Variables

Al igual que en el sistema anaerobio, intervienen distintos tipos de variables (Gutiérrez, 2004), en este caso de respuesta y manipulables.

Sin embargo, en este sistema no se profundiza tanto como en el anaerobio, por tratarse de una primera versión del sistema.

2.3.2.1 Variables de respuesta

Como variable de respuesta será utilizado el decremento de presión, como indicador del consumo de oxígeno. Cabe mencionar que para contrarrestar el efecto de la presión positiva que genera la producción de CO_2 , los reactores del sistema aerobio cuentan con un depósito en el cual se colocan perlas de hidróxido de potasio, KOH, esto se explica más adelante.

2.3.2.2 Variables manipulables

El sistema aerobio cuenta con la opción de capturar aire o no después de cada medición, la variable es hacer un experimento con captura de aire y otro sin captura de aire.

2.3.3 Cuantificación del oxígeno

La cuantificación del oxígeno consumido por los microorganismos está basada en el monitoreo de los decrementos de presión en cada reactor por un minuto y a un tiempo previamente fijado en los datos iniciales de la prueba, es decir, cuantifica la cantidad total del oxígeno consumido y, el software permite la determinación de su proporción en milimoles.

Después de cada medición de presión, se hace una purga para compensar con la presión atmosférica y que cada medición de presión negativa sea medida durante el tiempo fijado sin interferencias. Un problema por resolver en esta parte del sistema es contrarrestar la presión positiva que genera el CO_2 , para ello fue necesario diseñar un reactor con un depósito para generar una reacción con el CO_2 , esto se explica más adelante.

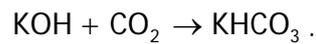
El sistema también llevará un registro de la baja de presión, esto es la suma de los decrementos de la presión medida en cada reactor, éstos registros pueden abrirse como un documento de texto y ser transportados a EXCEL para un análisis más detallado de los resultados, de la misma forma que los registros que se producen en la parte de prueba de la biodegradabilidad anaerobia.

2.3.3.1 Reactor Aerobio

Los reactores ocupados en la prueba de biodegradabilidad aerobia con una capacidad de 250 mL, fueron manufacturados especialmente por el Ingeniero Óscar Ángel Viruela Hernández, la figura 2.7 muestra el diseño del reactor.

Para comprender el diseño del reactor, debe comentarse que, el bióxido de carbono, CO_2 , producido por los microorganismos genera una presión positiva y el consumo de oxígeno genera una presión negativa. Por lo que, una de las dos presiones debe ser contrarrestada, de lo contrario, ambas presiones se equilibrarían y no se podría realizar ninguna medición del cambio de presión.

Para medir el consumo de oxígeno, es necesario contrarrestar el CO_2 contenido en la fase gaseosa del reactor. Para ello, el reactor cuenta con un depósito especial en el que se colocan unas perlas de hidróxido de potasio y en donde se llevará a cabo la siguiente reacción:



En la reacción anterior, puede observarse claramente que el CO_2 producido por los microorganismos es limitado químicamente por el KOH contenido en el depósito de la tapa del reactor.

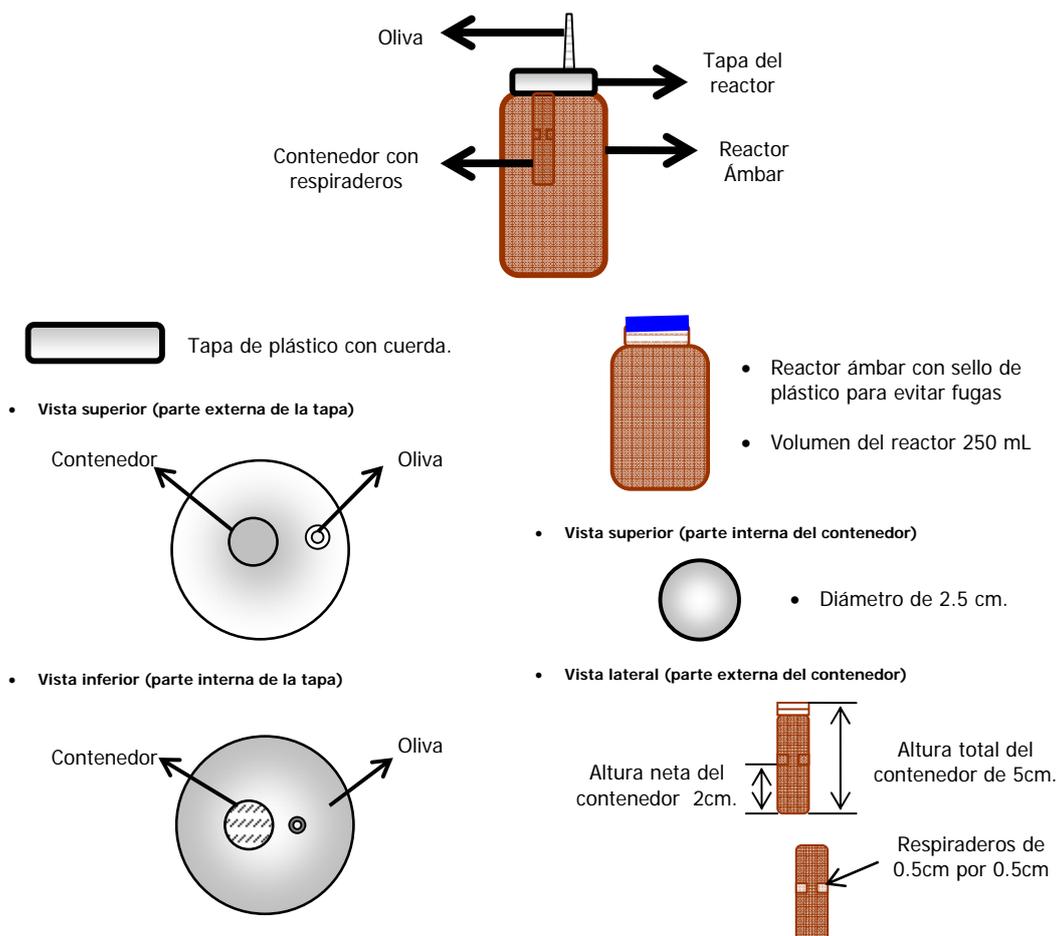


Figura 2.7 Detalles del reactor diseñado para el sistema aerobio.

Como puede observarse en la figura 2.7, el reactor se encuentra provisto de una salida llamada oliva, por medio de una manguera y algunas conexiones, ésta es conectada a una entrada de la válvula multiplexora que se une a una válvula solenoide directa y a su vez a un medidor de presión de vacío de 30" de Hg a 0 " Hg, una interfase de acondicionamiento de señales (IAS) y una tarjeta de adquisición de datos (TAD) propia para este sistema, sin ser involucrado el dispositivo de la prueba para la determinación de la biodegradabilidad anaerobia

2.3.4 Inicialización y operación del sistema

2.3.4.1 Datos iniciales

El sistema también contará con un software que antes de iniciar la prueba, requerirá de algunos datos iniciales para el registro del archivo, éstos son:

- fecha, hora de inicio de la prueba y datos del operador,
- número de reactores,
- tiempo de duración de la prueba y tiempo que falta para terminar la prueba
- volumen total de los reactores,
- volumen líquido de la mezcla en los reactores,
- volumen de las mangueras que conectan a las válvulas,
- tiempo de muestreo (tiempo de lectura de la baja de presión dentro de los reactores),
- nombre del archivo, y ubicación del archivo que registrará la baja de presión.

Esto permite un reporte completo de la prueba durante su desarrollo y algunas de sus condiciones iniciales.

2.3.4.2 Operación

Una vez iniciada la prueba y durante su desarrollo, el sistema permite la visualización del comportamiento que mantiene cada reactor, esto incluye:

- una animación de los reactores al momento del muestreo
- Fecha, hora de inicio de la prueba
- datos del operador,
- tiempo de duración de la prueba inicial y que falta para terminar la prueba
- presión instantánea y total en cada reactor,
- temperatura a la cual están expuestos los reactores,
- decremento en milimoles de oxígeno en cada reactor
- un botón para auto-revisión de fugas, y
- un botón para detener la prueba en caso de ser necesario.

La figura 2.8 muestra una pantalla de visualización del software del dispositivo.

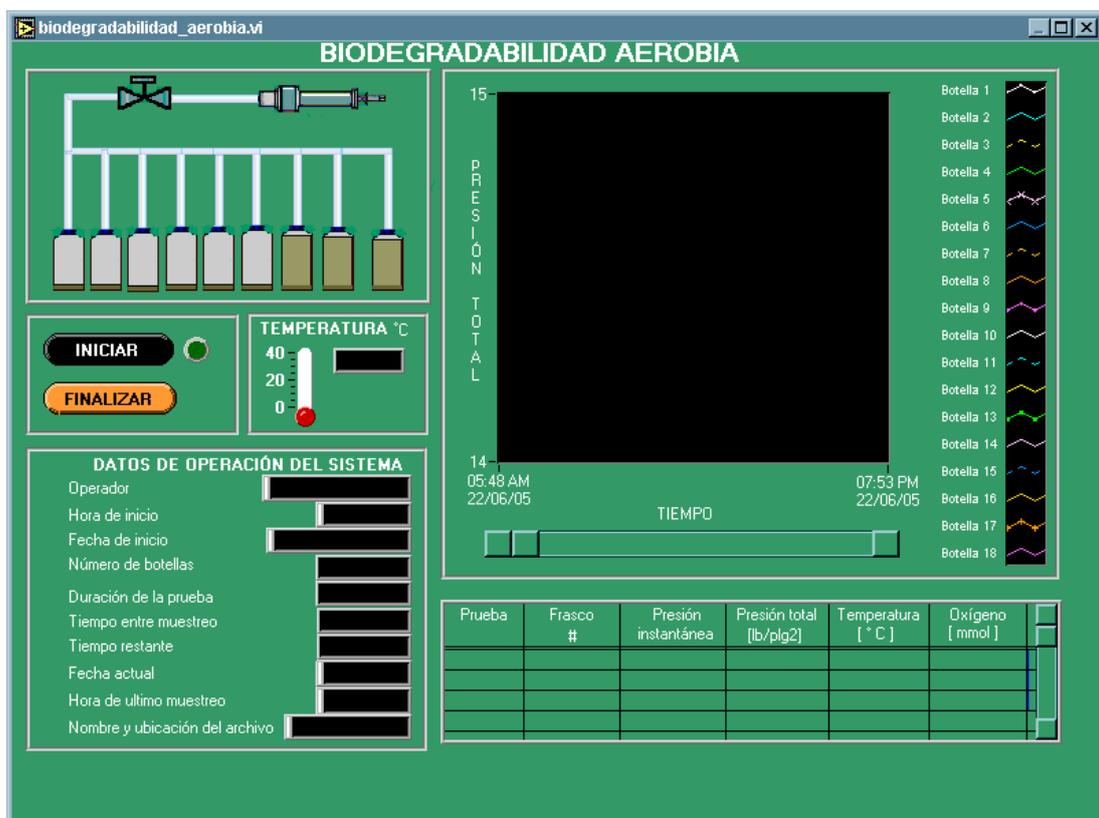


Figura 2.8 Pantalla de visualización del software del sistema aerobio.

2.3.5 Desarrollo de la prueba

Una prueba de biodegradabilidad aerobia consiste en el monitoreo de 9 reactores, todos los reactores se encuentran bajo las mismas condiciones y de la igual manera que en el sistema anaerobio.

En una prueba de biodegradabilidad aerobia, cada reactor contendrá una solución conformada de los siguientes componentes:

- Glucosa, utilizada como sustrato igual que en el sistema anaerobio
- Medio mineral aerobio, descrito en el apéndice A1.3
- Como inóculo, se utilizó biomasa aerobia proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria.
- Agua destilada para completar el volumen.

En cada reactor se preparó una solución de medio mineral con agua destilada y se inóculo con la biomasa aerobia y la glucosa. Una vez preparados los reactores se mantuvieron a una temperatura constante de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, en una incubadora PRECISION[®] modelo 5EM.

Para favorecer el contacto del sustrato y la biomasa, así como el del CO_2 producido con las grageas de hidróxido de potasio del depósito del reactor, se mantuvo una agitación constante de 70 RPM en un agitador orbital LABE LINE INSTRUMENTS[®], modelo 4626

Para la determinación de la concentración de biomasa se utilizó la técnica de determinación de sólidos. La concentración de la glucosa fue medida en términos de DQO, en mgL^{-1} . El medio de nutrientes fue realizado de acuerdo al apéndice II de este trabajo.

2.3.6 Pruebas exploratorias

Para comprobar el funcionamiento del sistema de acuerdo a lo mencionado en el objetivo específico descrito en el capítulo 2, se realizaron 2 pruebas.

Se ensayó una relación $\frac{500 \text{ mg glucosa/L}}{1000 \text{ mg SSV/L}}$ que equivale a $\frac{533.7 \text{ mg DQO/L}}{1000 \text{ mg SSV/L}}$ en la relación de

volúmenes $F_{\text{gas}}/ F_{\text{liq}} = 100/150$, que fue determinada por el volumen del reactor y sobre todo para evitar que en la agitación se presentaran interferencias entre la solución y las grageas de KOH del depósito del reactor.

Este experimento se realizó con dos variantes ya mencionadas, la experimentación con y sin compensación de presión, para observar el comportamiento entre un experimento y el otro.

2.3.6.1 Con compensación de presión

Este experimento, se realizó bajo las condiciones antes mencionadas, pero en los datos iniciales del sistema se dio la instrucción de abrir la válvula actuadora para permitir el paso del aire y compensar con ello la presión dentro del reactor.

2.3.6.2 Sin compensación de presión

Al igual que en punto anterior, la experimentación se realizó bajo las condiciones ya mencionadas, pero sin la instrucción de abrir la válvula actuadora para permitir el paso del aire.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Sistema Automatizado

En este apartado se presentan los resultados obtenidos con el sistema automatizado, en donde se presentan los resultados y una discusión de ellos.

Como primer resultado se muestran algunas fotografías del sistema automatizado anaerobio y aerobio, su descripción ya ha sido hecha anteriormente, pero esto mejora el estado final del equipo.

Dada la cantidad de resultados obtenidos para el sistema anaerobio, debe recordarse que se realizaron 5 experimentos cada uno compuesto de tres pruebas, se muestran los resultados por experimento tanto de su repetibilidad como de su precisión. El apéndice 2 muestra los resultados de las pruebas de cada experimento, para su consulta en caso de ser necesario.

Para el sistema aerobio, se realizó un experimento exploratorio para determinar su funcionamiento, éste también incluye el cálculo de su repetibilidad y precisión en su medición.

3.2 Sistema Anaerobio

3.2.1 Esquema del sistema

La figura 3.1 muestra una fotografía del sistema en operación, dónde se observa la PC, el gabinete, la incubadora, el agitador y los reactores del sistema. La figura 3.2, presenta un esquema desarrollado de cada uno de sus componentes.

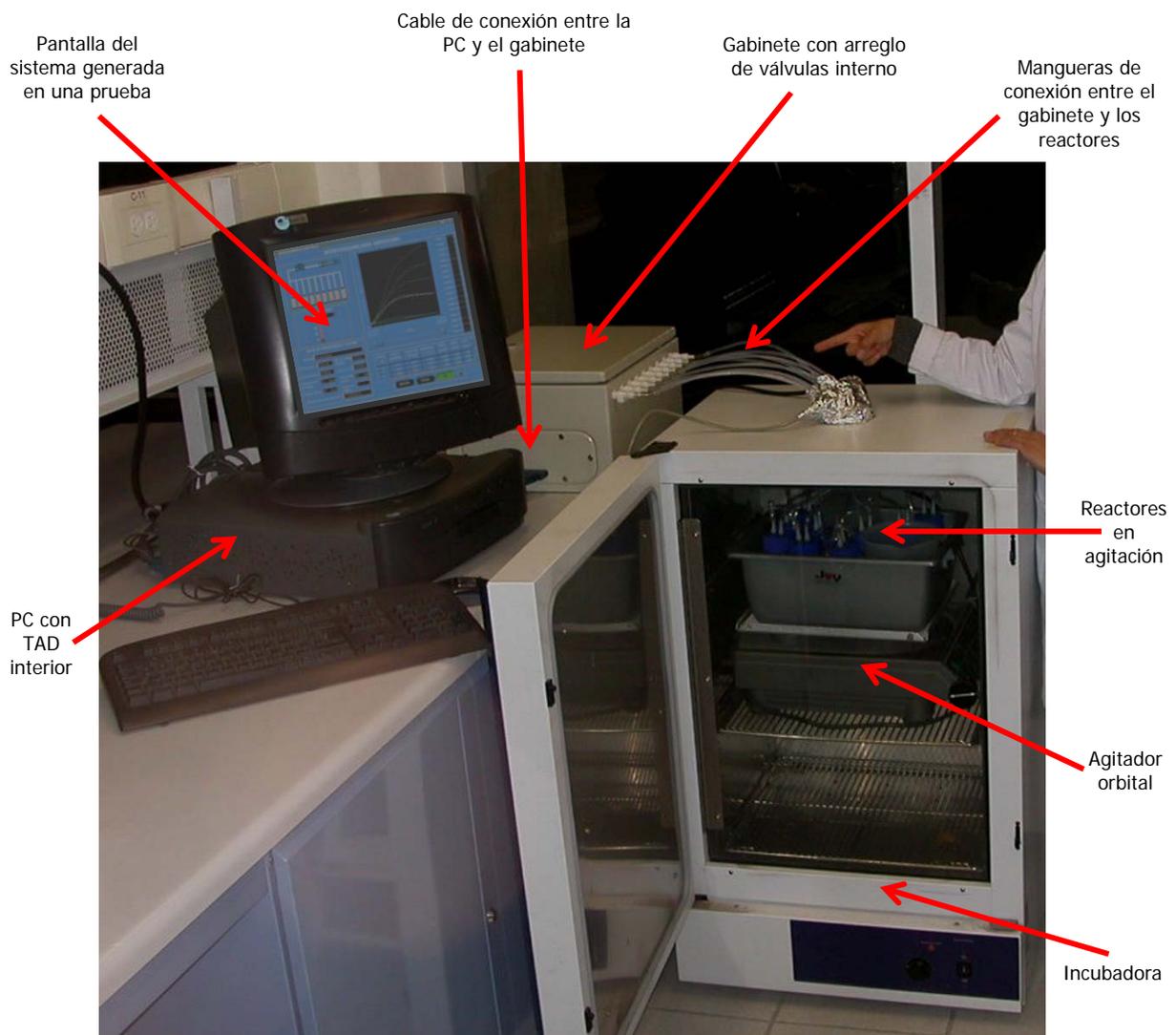
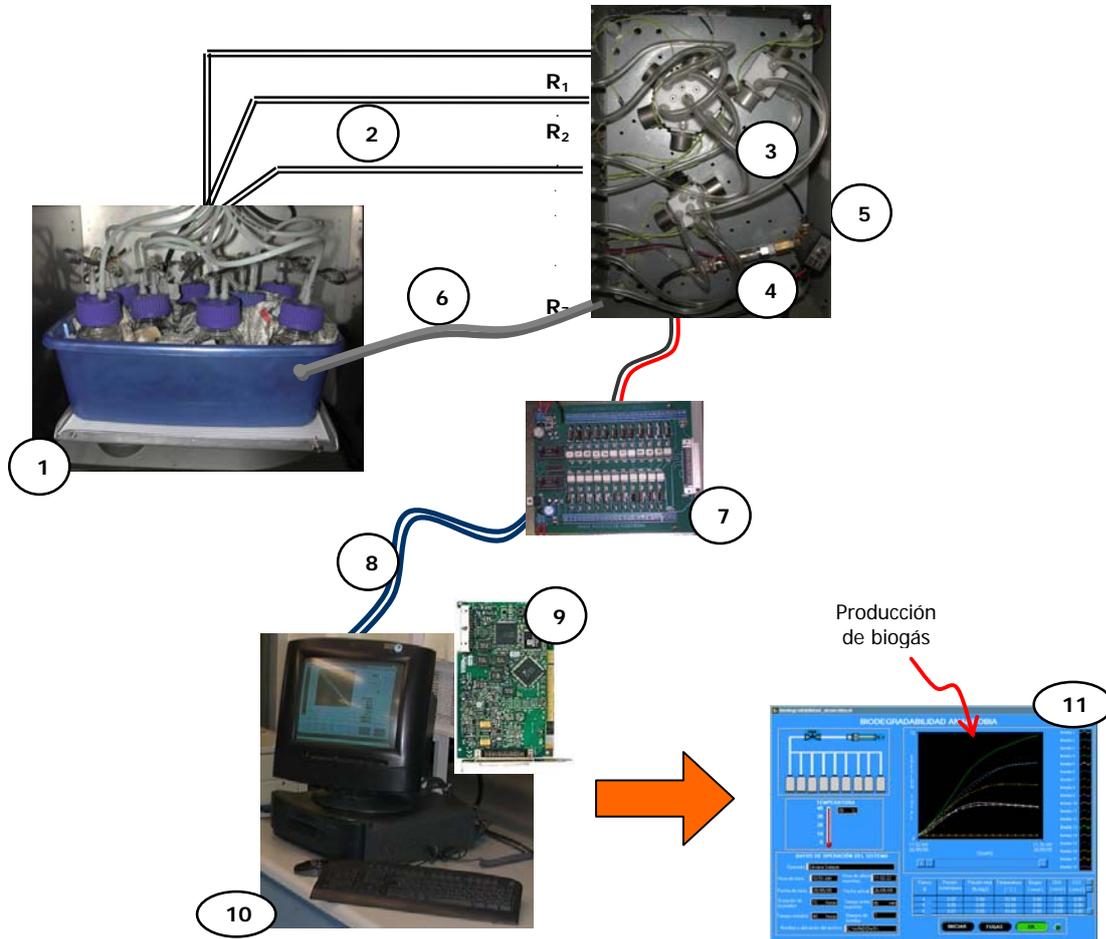


Figura 3.1 Fotografía del sistema en operación.



1. Reactores sobre agitador orbital dentro de incubadora; **2.** Mangueras de unión entre cada reactor y cada válvula multiplexora; **3.** Arreglo de válvulas multiplexoras solenoides; **4.** Transductor de presión, **5.** Válvula solenoide actuadora; **6.** Sensor de temperatura; **7.** Interfaz de Acondicionamiento de Señales (IAS); **8.** Conector para la IAS y la Tarjeta de Adquisición de Datos (TAD); **9.** Tarjeta de Adquisición de Datos (TAD); **10.** Computadora Personal (PC) con TAD interna; **11.** Pantalla generada por el software del sistema en una prueba de biodegradabilidad.

Figura 3.2 Esquema detallado del sistema automatizado anaerobio.

3.2.2 Prueba de calibración

Antes de iniciar la experimentación con el equipo y en general después de cada eventualidad presentada, era necesario comprobar el funcionamiento del sistema. Para ello se llevaron a cabo pruebas de calibración del sistema.

Estas pruebas consistieron en la inyección de presión en cada tiempo de muestreo y con ello se verificó que el sistema realizara correctamente sus mediciones, el registro y presentación de las mismas.

En la prueba de calibración, se inyectaron alrededor de 3 lb/plg² de presión cada 30 minutos durante 4 horas de manera manual con un baumanómetro adaptado, con ello se simuló la presión generada en los reactores en una prueba y, con esto, se corroboró que el sistema registró las presiones y se generó correctamente una curva de presiones totales.

En la tabla 3.1 se muestra la presión inyectada a cada reactor con el baumanómetro y el registro de presiones totales que hace el sistema para cada uno, la diferencia en los decimales registrados se debe al tipo de baumanómetro utilizado y la sensibilidad del operador al manejarlo.

Tabla 3.1 Registro de presiones en la prueba de calibración en el sistema anaerobio.

Inyección de alrededor de 3 psi	Presión registrada en los reactores (psi)							Presión media (psi)	D std	CV (%)
	1	2	3	4	5	6	7			
0	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.2	0.31	0.04	13.85
1	3.8	3.7	3.7	3.5	3.7	3.7	3.6	3.65	0.07	2.02
2	7.2	7.0	7.0	6.8	7.0	7.1	6.9	7.01	0.10	1.47
3	10.7	10.4	10.4	10.2	10.6	10.6	10.4	10.46	0.16	1.52
4	14.1	13.9	13.8	13.7	14.0	14.1	13.9	13.90	0.14	1.00
5	17.5	17.4	17.3	17.2	17.4	17.5	17.2	17.33	0.15	0.87
6	21.0	20.8	20.7	20.6	20.9	21.0	20.6	20.79	0.17	0.79
0 psi	21.0	20.8	20.7	20.6	20.9	21.0	20.6	20.79	0.17	0.79
0 psi	21.0	20.8	20.7	20.6	20.9	21.0	20.6	20.79	0.17	0.79

La figura 3.3 muestra la pantalla del sistema anaerobio generada en la prueba de calibración a partir de los datos que se presentaron en la tabla anterior (3.1). En esta pantalla, se puede observar la semejanza entre las curvas y esto demuestra a simple vista la repetibilidad del sistema, que siendo calculada en la tabla 3.1 como el coeficiente de variación, muestra un valor inicial del 13.85% y se reduce a menos del 1%.

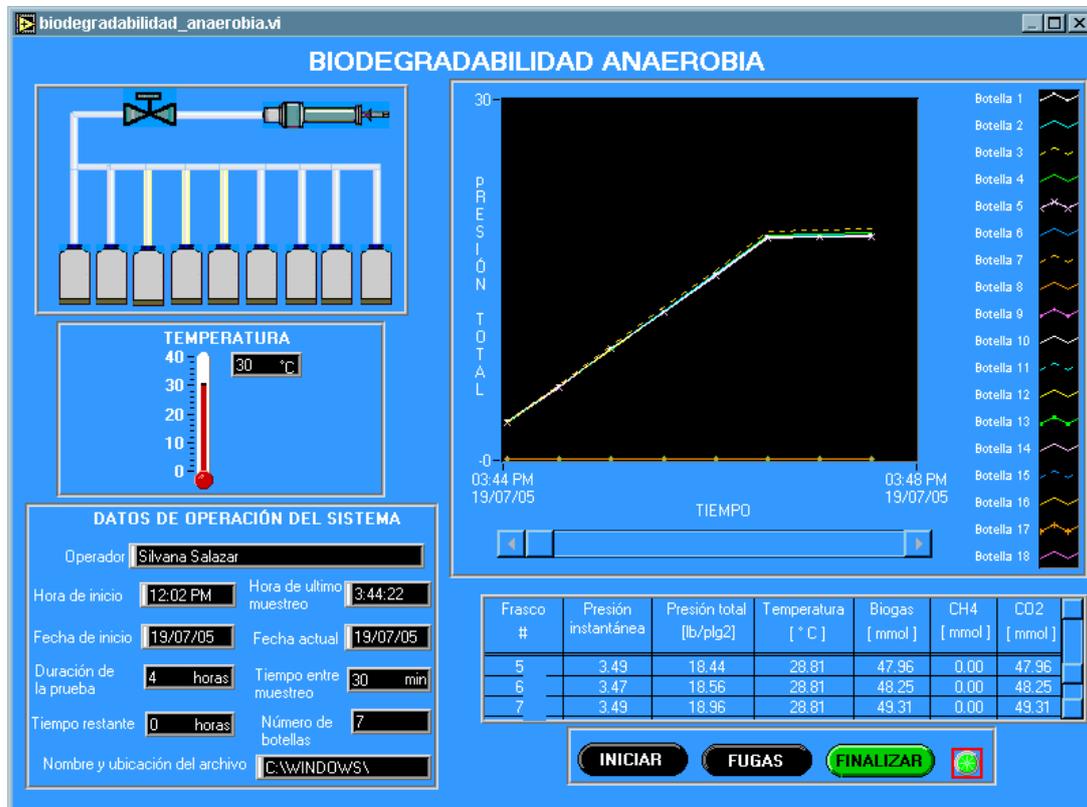


Figura 3.3 Prueba de calibración realizada de manera manual en el sistema.

3.2.3 Relación $S_o/X_o = 0.1067$ mg DQO/ mg SSV

Este experimento, se realizó por triplicado en sus distintas relaciones en fase_{gas}/fase_{liquida} (50/200, 100/150, 150/100) y no se obtuvieron datos registrados por el sistema.

Para corroborar la correcta realización de la técnica y verificar el sistema, esta relación se repitió bajo las mismas condiciones, incrementando el tiempo de muestreo de 90 a 1440 minutos (es decir, cada 24 horas). Considerando que, probablemente la producción de biogás en un tiempo de muestreo de 90 minutos, no era una cantidad suficiente para generar una presión que el sensor pudiera detectar.

Sin embargo, aún incrementando el tiempo de muestreo a 1440 minutos (24 horas) no se detectó nada por el sistema, razón por la cual se decidió ya no explorar más ésta relación y se

consideró un límite de detección del sistema. La figura 3.4 muestra una de las pantallas generadas para este experimento y puede observarse que no hay dato relevante registrado por el sistema.

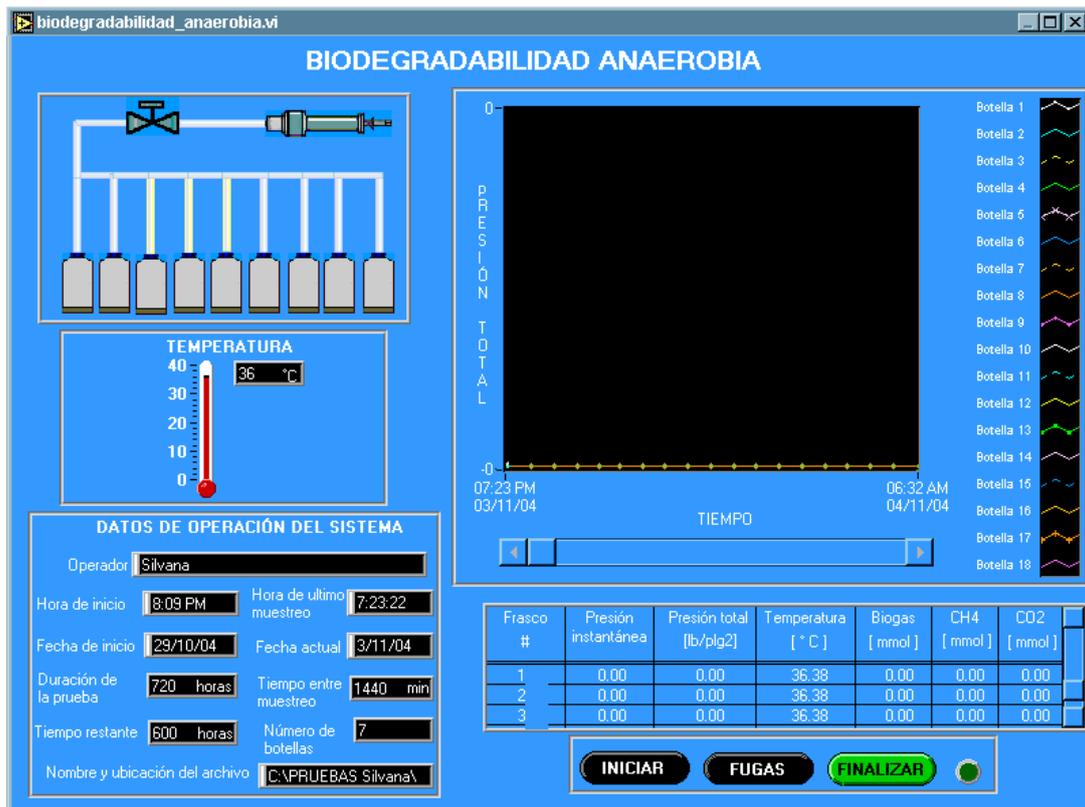


Figura 3.4 Pantalla de una prueba del experimento $S_o/X_o=0.1067$ mg DQO/ mg SSV en una relación $F_{gas}/F_{liq}= 50/200$ con un tiempo de muestreo de 1440 minutos (24 horas).

3.2.4 Relación $S_o/X_o = 0.2134$ mg DQO/ mg SSV

3.2.4.1 Relación en fase gas / fase líquida = 50/200

El experimento concluyó en un tiempo aproximado de 39 horas. La figura 3.5 muestra la pantalla generada en una de las pruebas de este experimento.

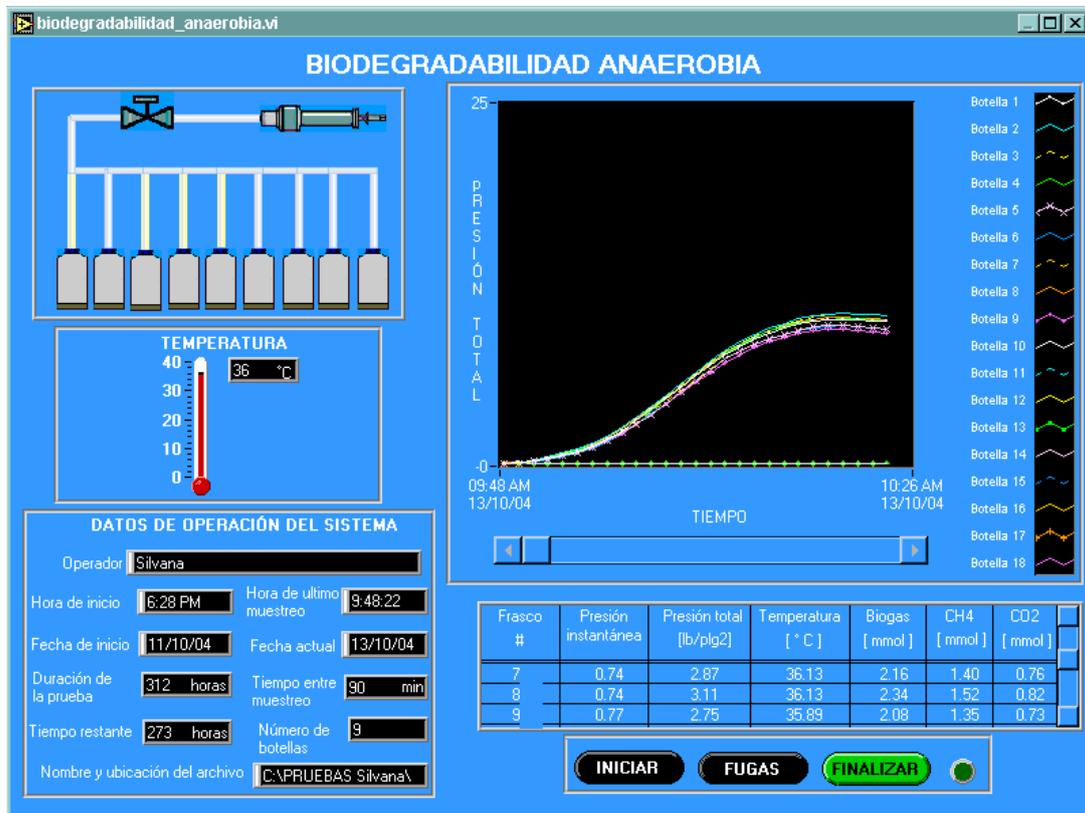


Figura 3.5 Pantalla en una prueba del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volúmenes en $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

Se realizó un análisis estadístico de las presiones totales obtenidas en el experimento, obteniendo un coeficiente de variación, CV, de 3.66%, con ello se puede demostrar la repetibilidad de los resultados del sistema. Esta gráfica se presenta en el apéndice II, figura AII.1, debido a la gran cantidad de gráficas presentadas en este capítulo.

A partir de las presiones que registra el equipo, denominadas presiones instantáneas, y utilizando la fórmula de los gases ideales, se puede obtener la rapidez de producción de moles de biogás para cada tiempo de muestreo, la figura 3.6 muestra la gráfica.

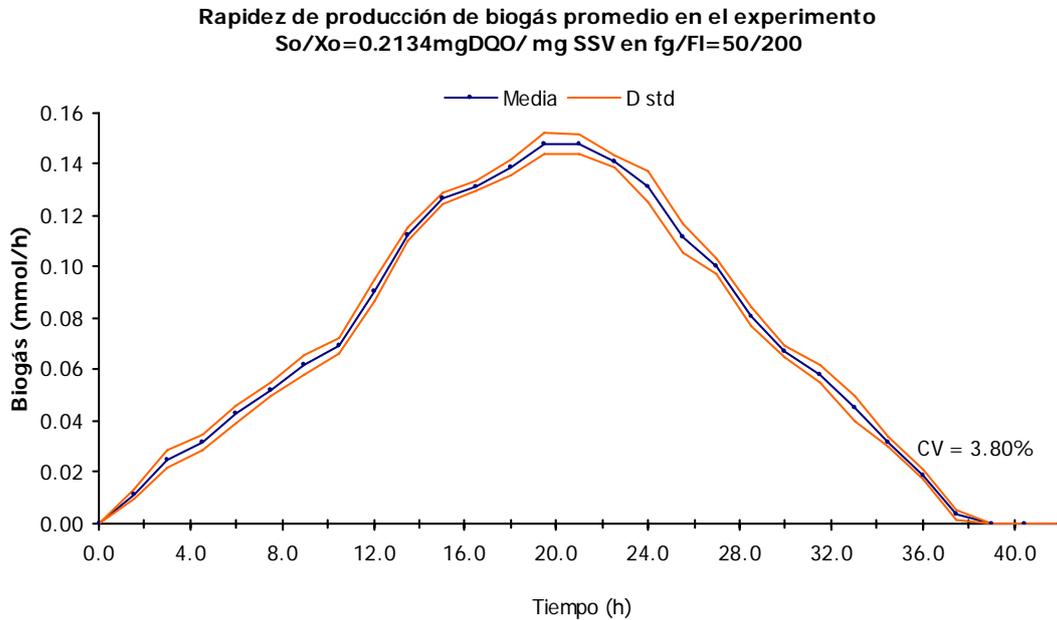


Figura 3.6 Rapidez de producción de biogás promedio y desviación estándar del experimento
 $S_o/X_o=0.2134\text{ mg DQO}/\text{mg SSV}$ en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$

En esta gráfica (figura 3.6) se observa una etapa de actividad microbiana hasta antes de las 16 horas de experimentación, posteriormente, se presenta la mayor producción de biogás, que sucede entre las 20 y las 24 horas. El análisis estadístico arroja un coeficiente de variación de 3.80%.

Otro factor muy importante de reportar es la temperatura, como puede verse en la figura 3.7 se mantiene casi constante durante todo el experimento, siempre alrededor de los 37°C.

Se presenta una ligera variación inicial del experimento, esto se debe a la pérdida de calor en la incubadora durante la colocación de los reactores al comienzo del experimento, pero una vez iniciado el ensayo no se presentan cambios relevantes.

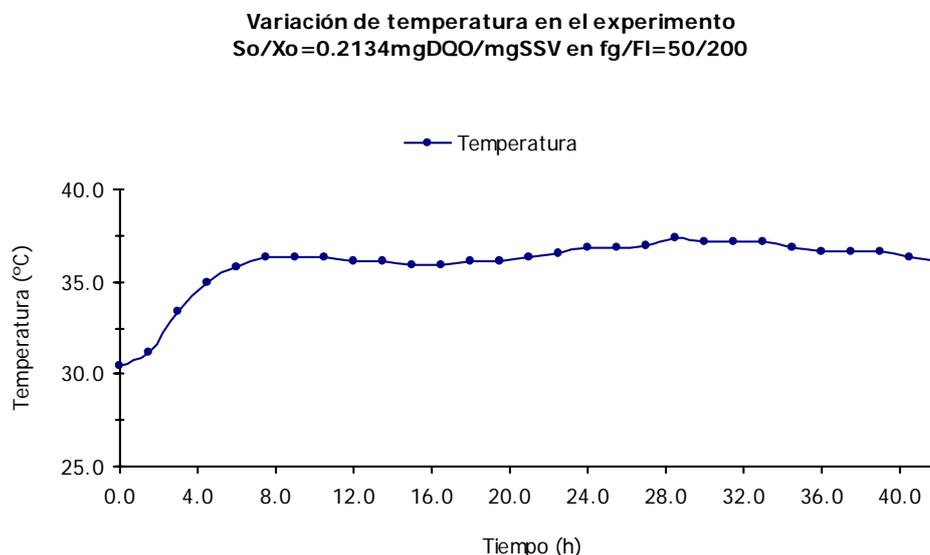


Figura 3.7 Temperatura promedio del experimento $S_o/X_o=0.2134\text{ mg DQO}/\text{mg SSV}$ en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

Para determinar la precisión del equipo, se calculó el porcentaje de error, %E, tal como se explica en el capítulo 3. En este experimento, los moles de metano teóricos son 0.6064 mmol, mientras que a partir de las presiones instantáneas registradas por el sistema, se determinan la cantidad de los moles experimentales de metano, con un valor de 0.5127 mmol de CH_4 . Por lo tanto, se tiene:

$$\%Error = \left(\frac{0.6064 - 0.5127}{0.6064} \right) \cdot 100 = 15.46\%$$

Visto de otra manera, se observó que se recuperó el 84.54% del metano teórico. Para visualizar de una mejor manera este valor, en la figura 3.8 se presenta la media de la curva de metano total en el experimento, con sus respectivas desviaciones estándar, contrastando con una línea constante que representa el valor de los moles teóricos de metano. Se puede observar una clara proximidad entre el valor teórico de la producción de metano y la curva obtenida a partir de los datos experimentales, para confirmar éstos resultados, se determinó el coeficiente de variación y da un valor de $CV = 4.20\%$.

**Metano total promedio en el experimento $S_o/X_o=0.2134\text{mgDQO/mgSSV}$
en $f_g/f_l=50/200$**

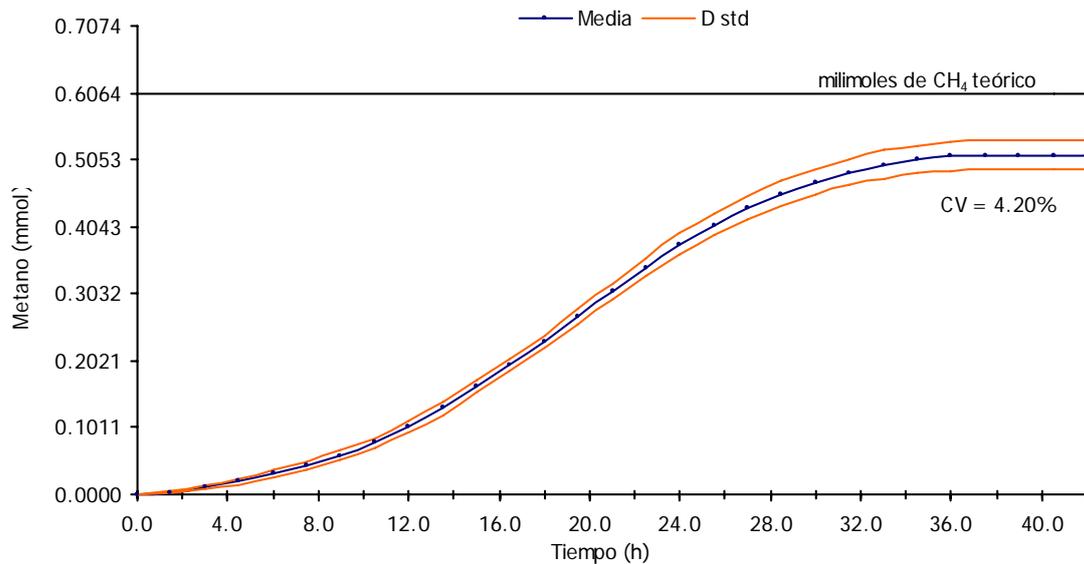


Figura 3.8 Metano total promedio del experimento $S_o/X_o=0.2134 \text{ mg DQO/mg SSV}$ en una relación $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

3.2.4.2 Relación en fase gas / fase líquida = 100/150

El experimento realizado en esta relación de volúmenes concluyó en un tiempo aproximado de 36 horas, de igual manera que en el experimento anterior el monitoreo se continuó hasta las 40.5 horas, para confirmar que ya no haya más producción de biogás, la figura 3.9 muestra la pantalla generada en una de las pruebas de este experimento.

En este caso, el análisis estadístico realizado en las presiones totales del experimento, se presenta un $CV = 2.10\%$, la gráfica se encuentra en el apéndice para su consulta en caso de ser necesario.

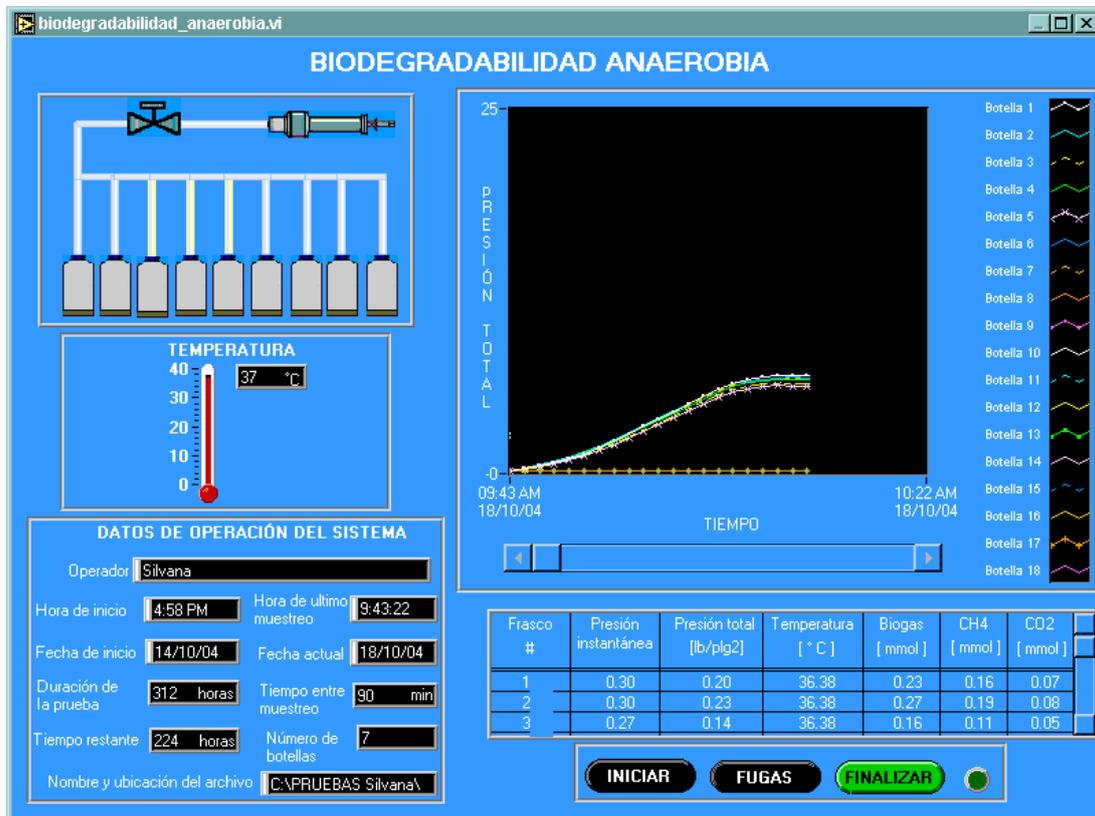


Figura 3.9 Pantalla generada en una de las pruebas del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volúmenes en $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

En la figura 3.10 se observa la rapidez de producción de moles de biogás de este experimento y es notorio como se presentó una etapa de actividad microbiana hasta antes de las 8 horas de experimentación mucho más abrupta que en el experimento anterior, y posteriormente, se presenta una producción de biogás más lenta, entre las 14 y las 22 horas, con $CV= 2.4\%$

La temperatura para este experimento se mantuvo constante, como puede verse en la figura 3.11 se encuentra una ligera caída alrededor de las 26 horas, esto se atribuye a la pérdida de calor al verificar los reactores dentro de la incubadora. Sin embargo y de igual manera que en el experimento anterior se presenta una ligera variación inicial que después se regula manteniéndose alrededor de los 37°C

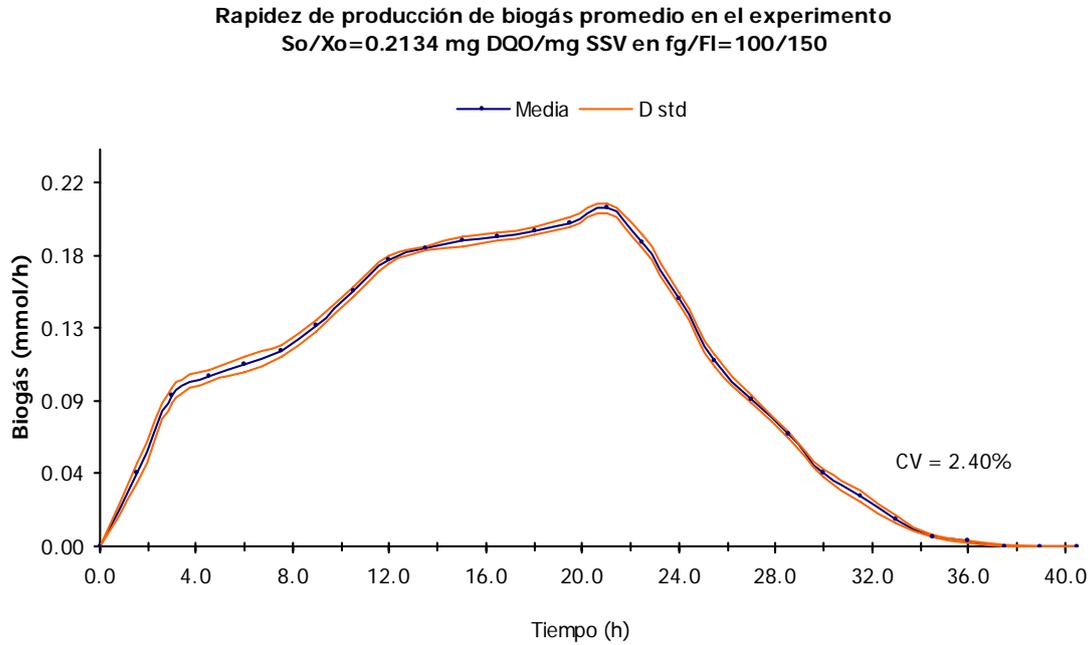


Figura 3.10 Rapidez de producción de biogás promedio y desviaciones estándar del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volúmenes en $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

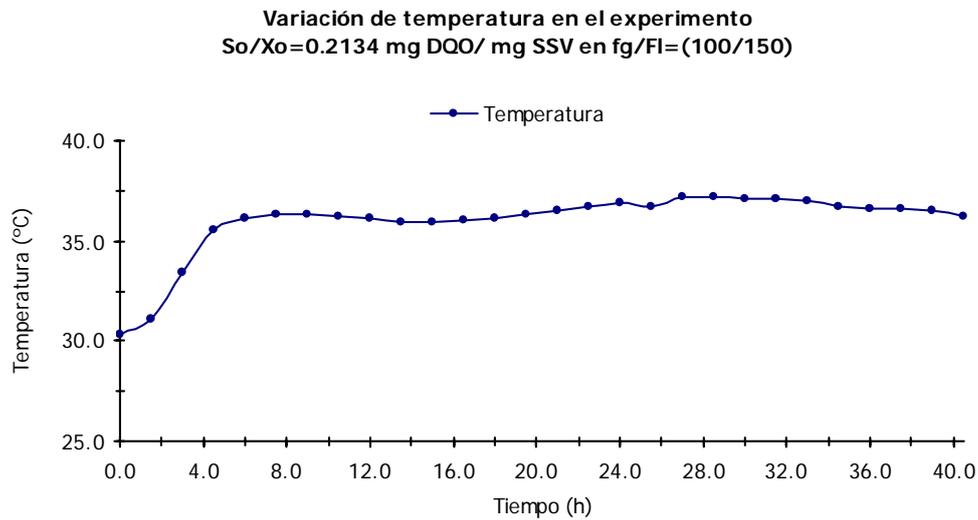


Figura 3.11 Temperatura promedio del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volúmenes en $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

En la figura 3.12 se muestra la media del metano total en el experimento, la desviación estándar y con una línea constante el valor de los moles teóricos de metano, 0.4548 mmol CH₄. En este caso %Error = 13.97% y un CV = 2.69%

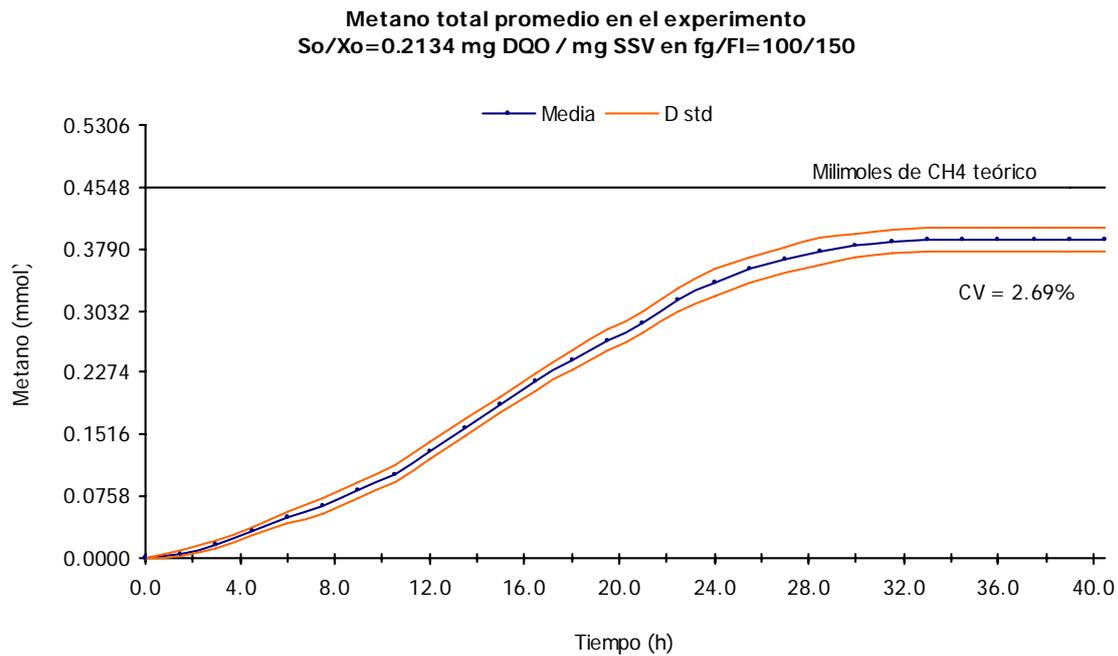


Figura 3.12 Metano total promedio del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/mg SSV en una relación $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

3.2.4.3 Relación en fase gas / fase líquida = 150/100

Para esta relación de volúmenes en fase gas y fase líquida, el tiempo de experimentación fue de 35 horas aproximadamente y el monitoreo se continuó hasta las 39 horas, también para confirmar que ya no haya más producción de biogás, la figura 3.13 muestra la pantalla generada en una de las pruebas de este experimento.

El CV para este experimento en presiones totales promedio del experimento es de 1.35%, ésta gráfica se puede consultar en el apéndice II, sección 3.

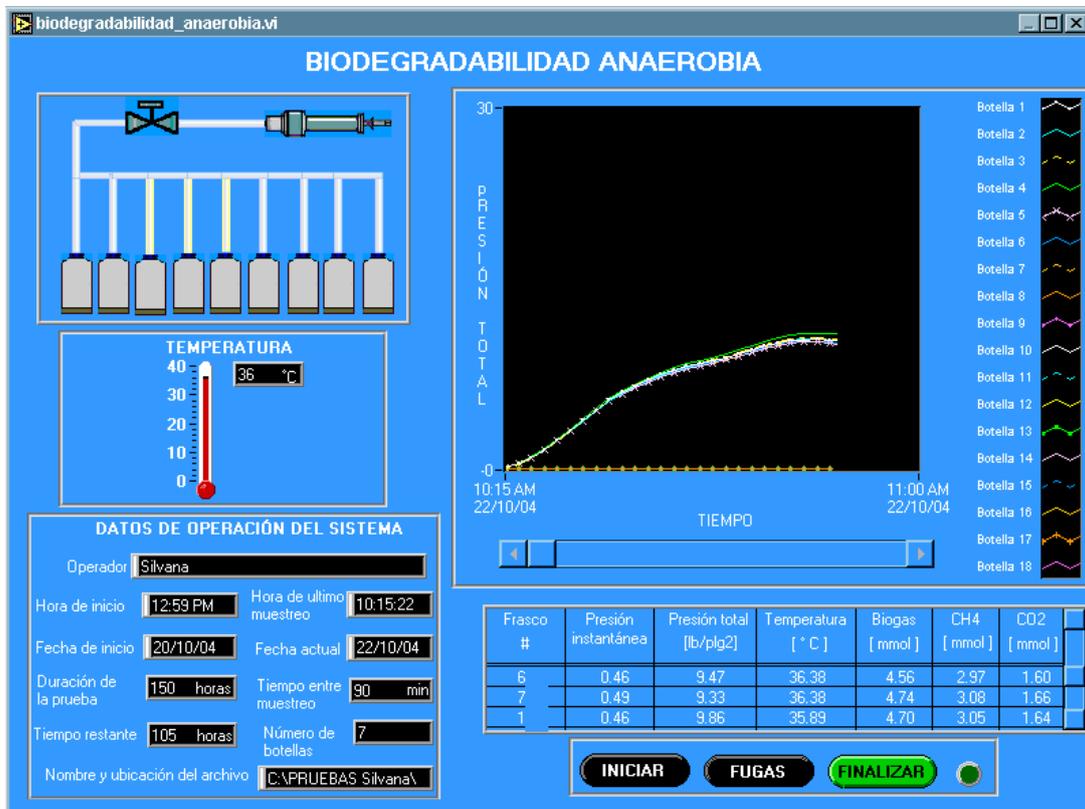


Figura 3.13 Pantalla generada en una de las pruebas del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/mg SSV en una relación de volúmenes en $F_{gas}/F_{liq}=150/100$

En la figura 3.14 se muestra la rapidez producción de moles de biogás de este experimento, con una actividad constante hasta las 16 horas y posteriormente disminuye lentamente.

El CV es bastante bajo comparado con el anterior, con un valor de 1.46%, lo que hasta el momento nos hace pensar en una mejor repetibilidad del equipo a mayores volúmenes en la fase gaseosa.

Como lo muestra la figura 3.15, la temperatura se reporta sin cambios importantes en este experimento.

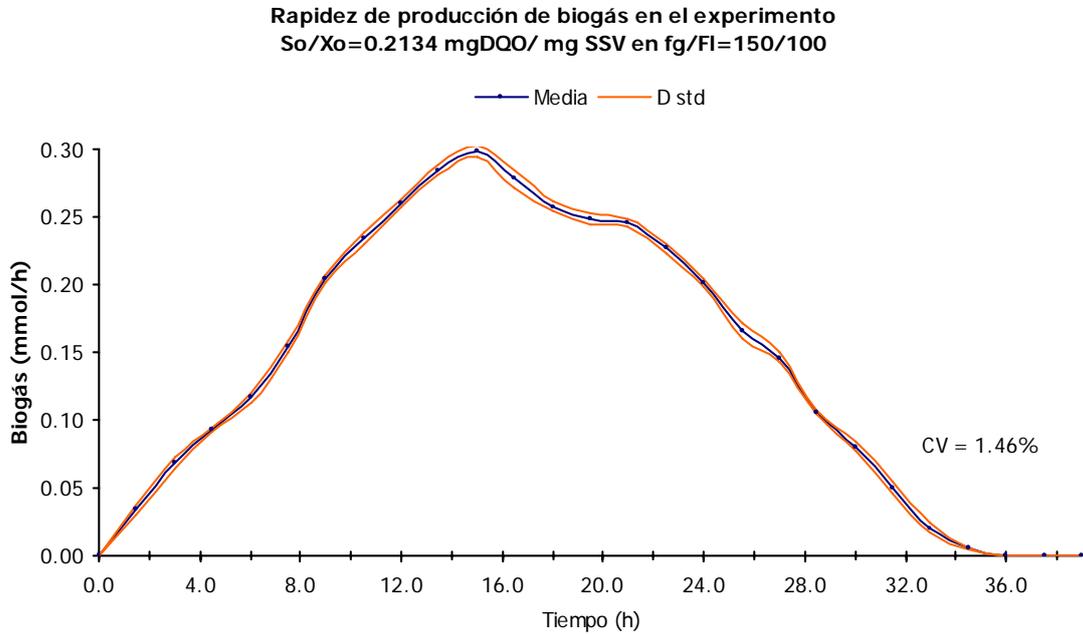


Figura 3.14 Rapidez de producción de biogás promedio y desviaciones estándar del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volúmenes en $F_{gas}/F_{liq}=150/100$.

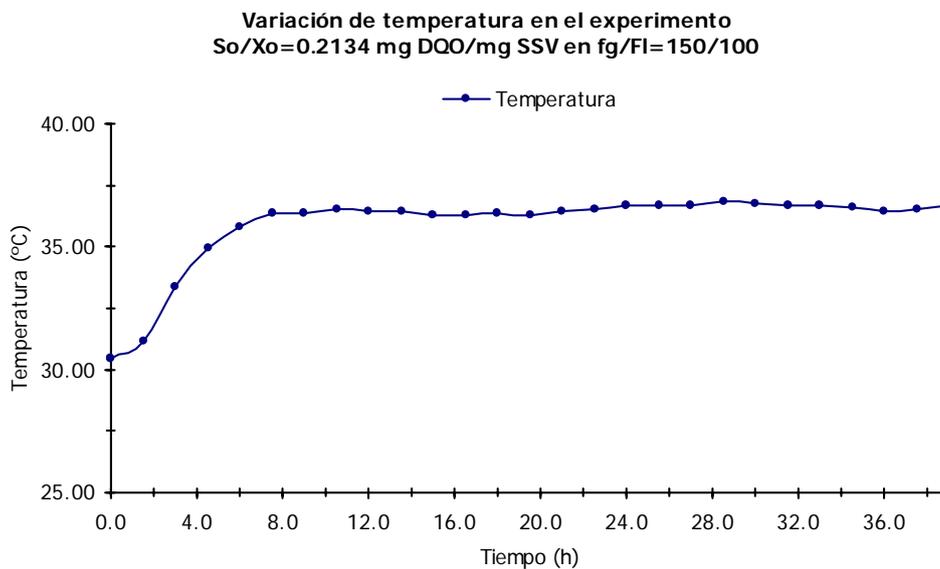


Figura 3.15 Temperatura promedio del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/mg SSV en una relación de volúmenes en $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

Se puede observar en la figura 3.16, la curva que representa los moles de metano totales en el experimento y su cercanía con el valor teórico = 0.3032 mmol CH₄, y esto nos proporciona un %Error= 11.73% y un CV=2.56%

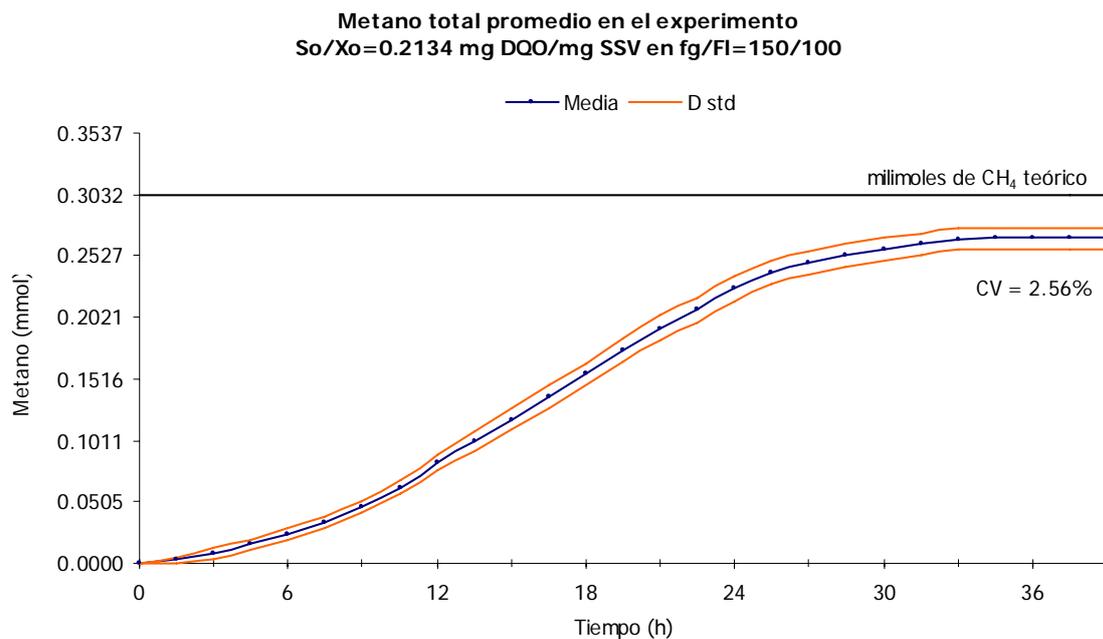


Figura 3.16 Metano total promedio del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/mg SSV en una relación $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

3.2.5 Relación $S_o/X_o = 2.134$ mg DQO/1000 mg SSV

3.2.5.1 Relación en fase gas / fase líquida = 50/200

Este experimento se concluyó en un tiempo de 93 horas y el monitoreo fue continuo hasta las 102 horas, el análisis estadístico del experimento muestra un CV = 4.63%. De igual manera que en todos los experimentos anteriores en las distintas relaciones, esta gráfica puede ser consultada en el apéndice 2. La figura 4.17 muestra una pantalla generada durante una de las pruebas de este experimento.

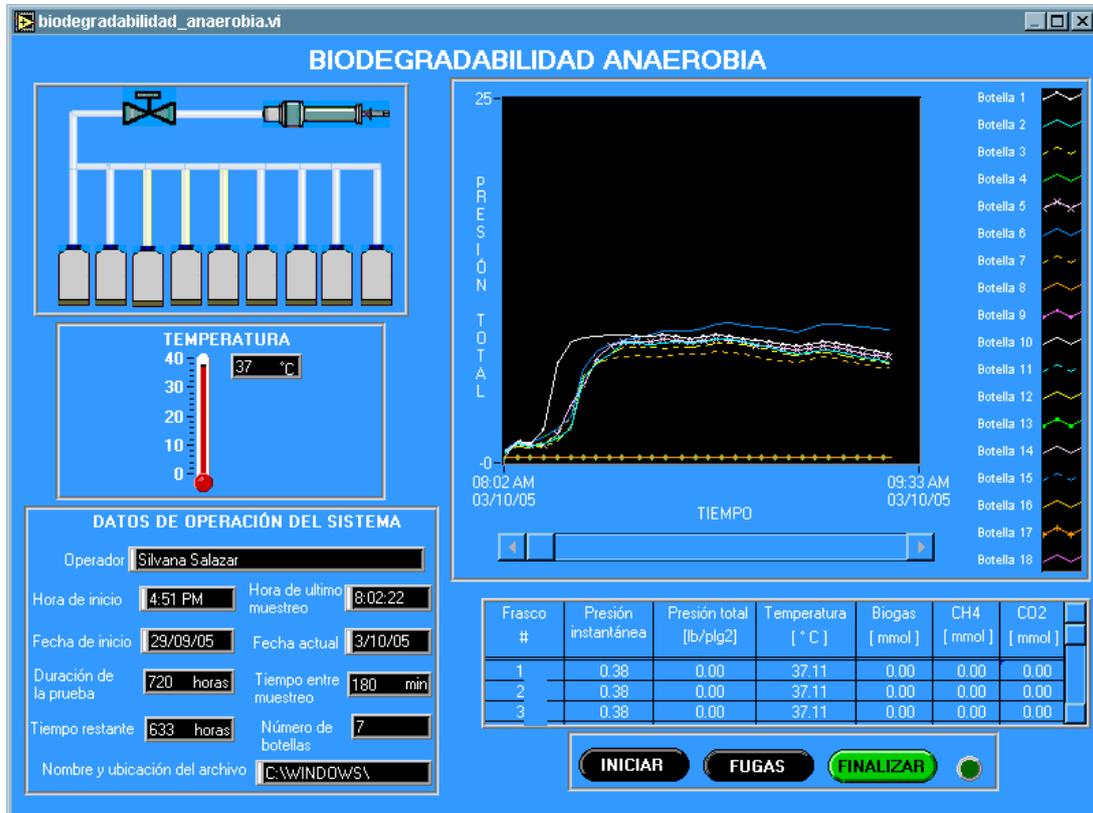


Figura 3.17 Pantalla generada en una de las pruebas del experimento $S_0/X_0=2.134 \text{ mg DQO/ mg SSV}$ en una relación de volúmenes en $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

La rapidez de producción de los moles de biogás, figura 3.18, presenta un comportamiento muy especial, pues inicialmente hay un incremento en la fase de latencia y posteriormente un decremento repentino, seguido de una producción de biogás rápida durante aproximadamente 21 horas y termina con una actividad ligera y casi intermitente.

El CV de este experimento presenta un valor mayor al de los experimentos anteriores, 4.83%, sin embargo, debe hacerse hincapié que es una relación S_0/X_0 diez veces mayor a la de los experimentos anteriores.

La temperatura presenta un valor promedio de 36.1°C y su comportamiento es un poco más brusco en este experimento (figura 3.18), debido a una pequeña eventualidad con el control de la temperatura. Sin embargo, se mantiene alrededor de los $37 \pm 2^\circ\text{C}$.

Rapidez de producción de metano en el experimento
 $S_o/X_o=2.134$ mgDQO/mg SSV en Fga/FI=50/200

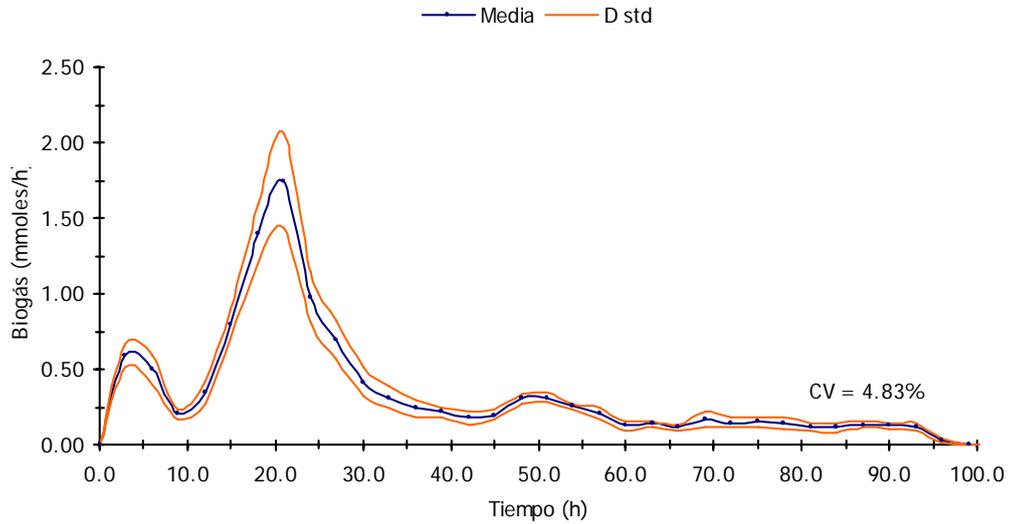


Figura 3.18 Rapidez de producción de biogás promedio y desviaciones estándar del experimento
 $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/mg SSV en una relación de volúmenes en $f_{gas}/F_{liq}=50/200$

Variación de la temperatura en el experimento
 $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/mg SSV en Fga/FI=50/200

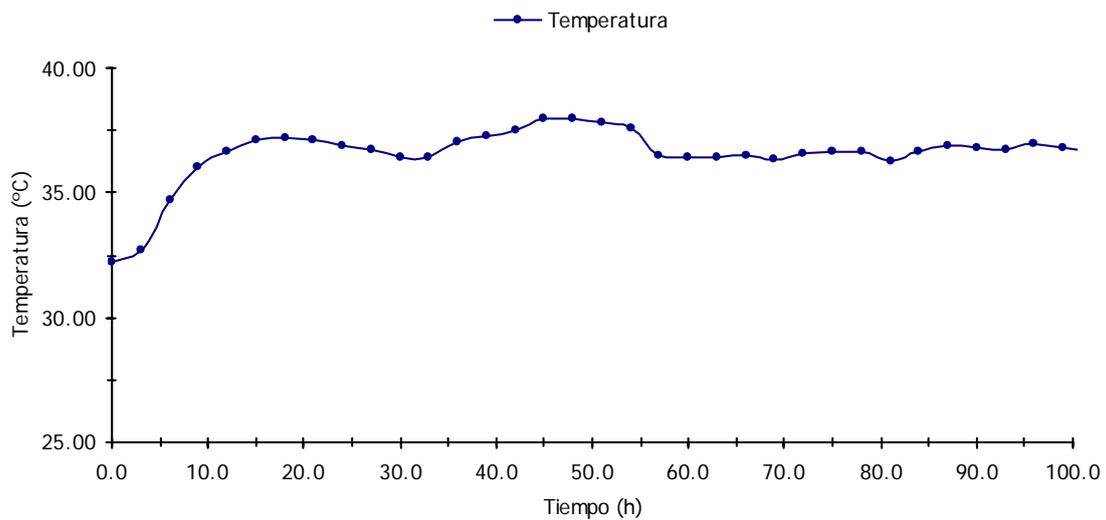


Figura 3.19 Temperatura promedio del experimento $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volúmenes en $f_{gas}/F_{liq}=50/200$.

El porcentaje de error (% Error) en este experimento presenta un valor de 5.56%, con un valor teórico de 6.0638 mmol de metano, un valor experimental de 5.2987 mmol de metano totales, y un CV = 4.83%. Esto se visualiza mejor en la gráfica presentada en la figura 3.20, donde se observa la cercanía entre ambos valores.

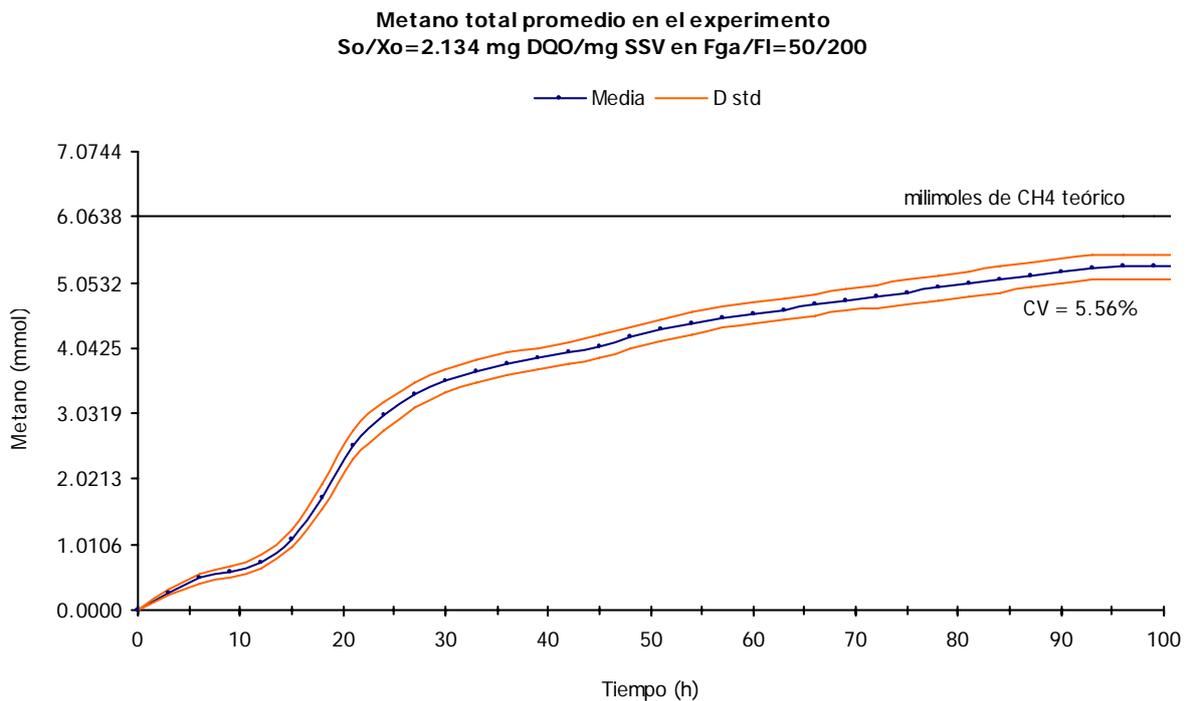


Figura 3.20 Metano total promedio del experimento $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/ mg SSV en una relación $f_{gas}/F_{liq}=50/200$.

3.3 Discusión de resultados

Debido a los objetivos planteados en esta tesis, se dividen en 3 subtemas importantes la discusión de resultados, para no perder vista los objetivos planteados en el capítulo debido a la cantidad de información obtenida.

Estos 3 subtemas son: límites de detección, repetibilidad y precisión.

3.3.1 Límites de detección del sistema

Como plantea uno de los objetivos específicos en la tesis, la determinación de los límites de detección del sistema es uno de puntos que conforman su validación, es por eso que se realizaron ensayos variando la relación S_0/X_0 .

Debido a que hasta el momento no existe como tal un cálculo conocido para determinar la presión generada por una cierta relación S_0/X_0 , la determinación del límite de detección del sistema es más de prueba y error que calculado.

La primera relación de sustrato microorganismo ensayada fue, $0.1067 \frac{\text{mg DQO}}{\text{mg SSV}}$ y a pesar de ensayar las distintas relaciones de volumen, no se obtuvieron registros de presiones en el tiempo de muestreo fijado de 90 minutos. Razón por la cual, se decidió ampliar el tiempo de muestreo a 24 horas y no se obtuvieron los registros, por lo que ésta relación fue considerada un límite de detección del sistema.

Hasta el momento, no hay referencia de muchos sistemas o equipos como el utilizado en este proyecto. Al respecto, Angelidaki *et al* (1998) reporta un sistema muy parecido al presentado en este documento, con un transductor de presión con un rango de medición de 0 a 7.25 lb/plg² y un arreglo de válvulas de paso múltiple, sin embargo, las relaciones ensayadas son mayores en concentración de sustrato (3.5 g DQO/L) con respecto a las ensayadas en el sistema aquí presentado y no se presentan muchos datos con respecto al límite de detección del sistema.

El límite de detección es algo novedoso e importante, pues incluso las versiones anteriores del mismo sistema no reportan este dato, en ellos, la importancia es la parte de la automatización y la repetibilidad del sistema, por lo cual conocer este dato le aporta un valor agregado al sistema (Moreno *et al*, 1997; Buitrón, 2002; Buitrón *et al*, 2002).

3.3.2 Repetibilidad de los resultados del sistema

La repetibilidad del sistema está evaluada con la desviaciones estándar, expresada como el coeficiente de variación para facilitar su comparación (Van Laar *et al*, 2006).

En la tabla 3.2, se muestra un resumen de los coeficientes de variación presentados en las gráficas obtenidas con los datos registrados por el sistema, no son muy lejanos de los datos reportados por Moreno *et al* (1997), en una primera versión del equipo, pues se reporta un coeficiente de variación de 2.51% para las primeras 30 horas de prueba y 1.81% para todas las horas de duración del experimento, para una relación de 1 g DQO / g SSV. Sin embargo, en este sistema se ensayaron relaciones por arriba y por debajo de lo reportado, por lo que se podría decir que están dentro de lo aceptable y que en parte podría ser atribuido a la influencia de la variación en las relaciones de volumen.

Esto es, los coeficientes de variación tienden a reducirse con respecto a la disminución de la relación de volúmenes en la fase líquida, es decir a menor fase líquida menor coeficiente de variación. Esto puede deberse, a un mejor contacto entre los microorganismos y el sustrato, es decir, a menor fase líquida mejor contacto entre biomasa y sustrato y, por lo tanto una mayor repetibilidad del sistema.

Tabla 3.2 Coeficientes de cada experimento en sus distintas evaluaciones.

Relación So/Xo (mg DQO/mg SSV)	Fgas/Flíquida	Coeficientes de variación (%)			
		Tiempo prueba	Presión total	Rapidez de producción de biogás	Moles de metano
0.1067	ND	ND	ND	ND	ND
0.2134	50/200	42	3.66	3.8	4.20
	100/150	40.5	2.10	2.4	2.69
	150/100	39	1.32	1.46	2.56
2.134	50/200	80	4.63	4.83	5.56

ND =No detectada por el sistema

3.3.3 Precisión del sistema

La precisión del sistema como se mencionó anteriormente está determinada por medio de los porcentajes de error de cada experimento.

En general, la precisión de medición del equipo se mantiene con un porcentaje de error de 11.74 a 15.46%, en la tabla 3.3 se presenta un resumen de los porcentajes de error calculados.

Tabla 3.3 Porcentajes de error en cada experimento.

Relación S_o/X_o (mg DQO/mg SSV)	$F_{gas}/F_{liquida}$	Porcentajes de Error (%)
0.1067	ND	ND
0.2134	50/200	15.46
	100/150	13.97
	150/100	11.74
2.134	50/200	12.62

ND =No detectada por el sistema

Puede observarse que el porcentaje de error tiende a disminuir conforme disminuye el volumen en la fase líquida de los reactores, reiteradamente como en el tema anterior, puede deberse a que se favorece el contacto entre la biomasa y el sustrato. La ventaja de este mayor contacto, permite que la biomasa consuma el sustrato en un menor tiempo y por lo tanto la producción es mucho más rápida, comparativamente entre los experimentos realizados.

En la figura 3.20, se observan los valores del porcentaje del metano recuperado obtenido a partir de los datos que genera el mismo sistema. Como puede verse, estos porcentajes oscilan entre un 84.6 y 88.3 %, lo que proporciona resultados alentadores en esta segunda versión y sobre todo con una precisión entre los resultados obtenidos del 4% aproximadamente.

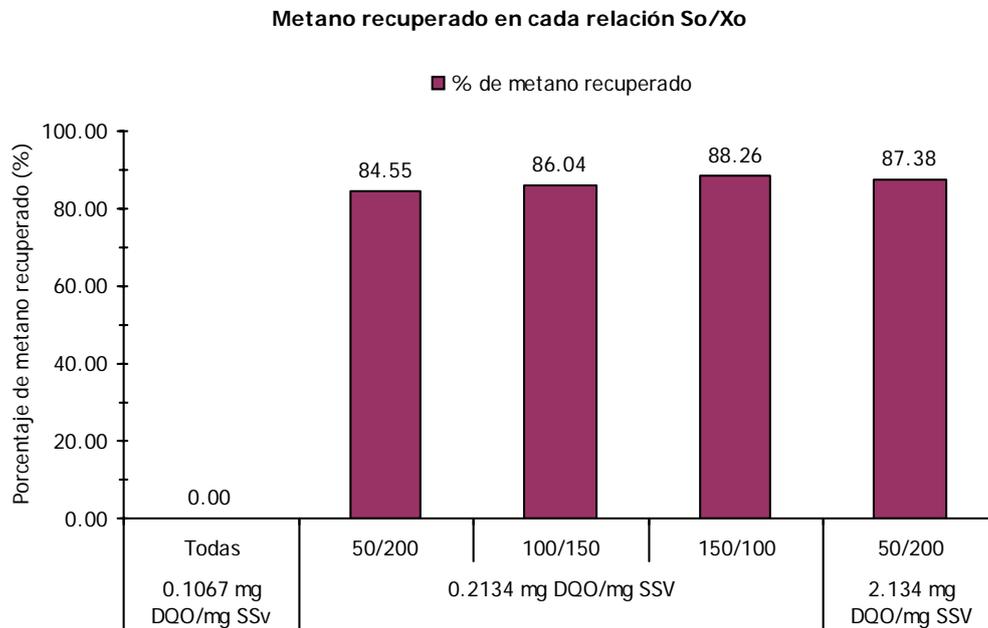
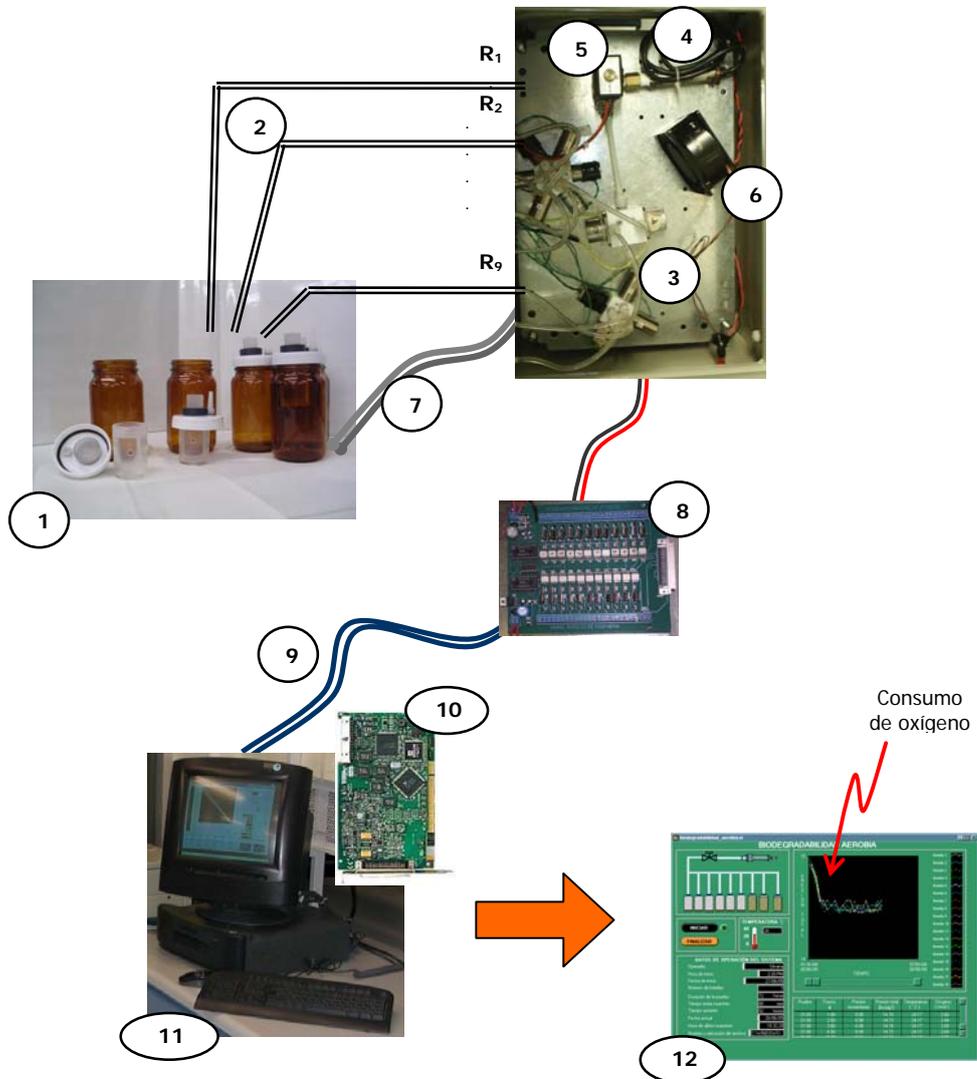


Figura 3.21 Metano recuperado para cada S_o/X_o en todos los experimentos.

3.4 Sistema aerobio

El sistema aerobio está conformado por la misma PC y TAD del sistema anaerobio, un gabinete en donde se encuentra la IAS y un arreglo de válvulas solenoides (igual que en el sistema anaerobio), con la diferencia de una válvula actuadora de presiones negativas o de vacío, y, en el que se pueden monitorear desde 7 hasta 18 reactores. Cuenta con una primera versión del software, basada en el lenguaje amigable del sistema anaerobio.

Debe mencionarse que en este sistema fue necesario adicionar un ventilador, para evitar el sobrecalentamiento, principalmente en la válvula solenoide multiplexora unificadora con la solenoide de presión. En la figura 3.22, se muestran las fotografías de los componentes de este sistema aerobio.



1. Reactores aerobios, mostrando depósito y oliva; **2.** Mangueras de unión entre cada reactor y cada válvula multiplexora; **3.** Arreglo de válvulas multiplexoras solenoides, en blanco con plateado; **4.** Transductor de presión negativa, con conexión dorada; **5.** Válvula solenoide actuadora de vacío; **6.** Ventilador; **7.** Sensor de temperatura; **8.** Interfaz de Acondicionamiento de Señales (IAS); **9.** Conector para la IAS y la Tarjeta de Adquisición de Datos (TAD); **10.** Tarjeta de Adquisición de Datos interna (TAD); **11.** Computadora Personal (PC) con la TAD; **12.** Pantalla generada por el software del sistema del decremento de presión generada en los reactores monitoreados.

Figura 3.22 Esquema detallado del sistema automatizado aerobio.

3.4.1 Prueba de calibración

Antes de iniciar cualquier prueba con el sistema aerobio, se realizó una prueba de calibración, ésta consistió en extraer presión con una jeringa de 20 mL cada 10 minutos durante 6 horas, simulando el funcionamiento en una prueba normal.

Mediante el registro de presiones realizadas por el sistema en esta prueba se pudo comprobar el funcionamiento del sistema.

La figura 3.23, muestra la pantalla generada en esta prueba de calibración.

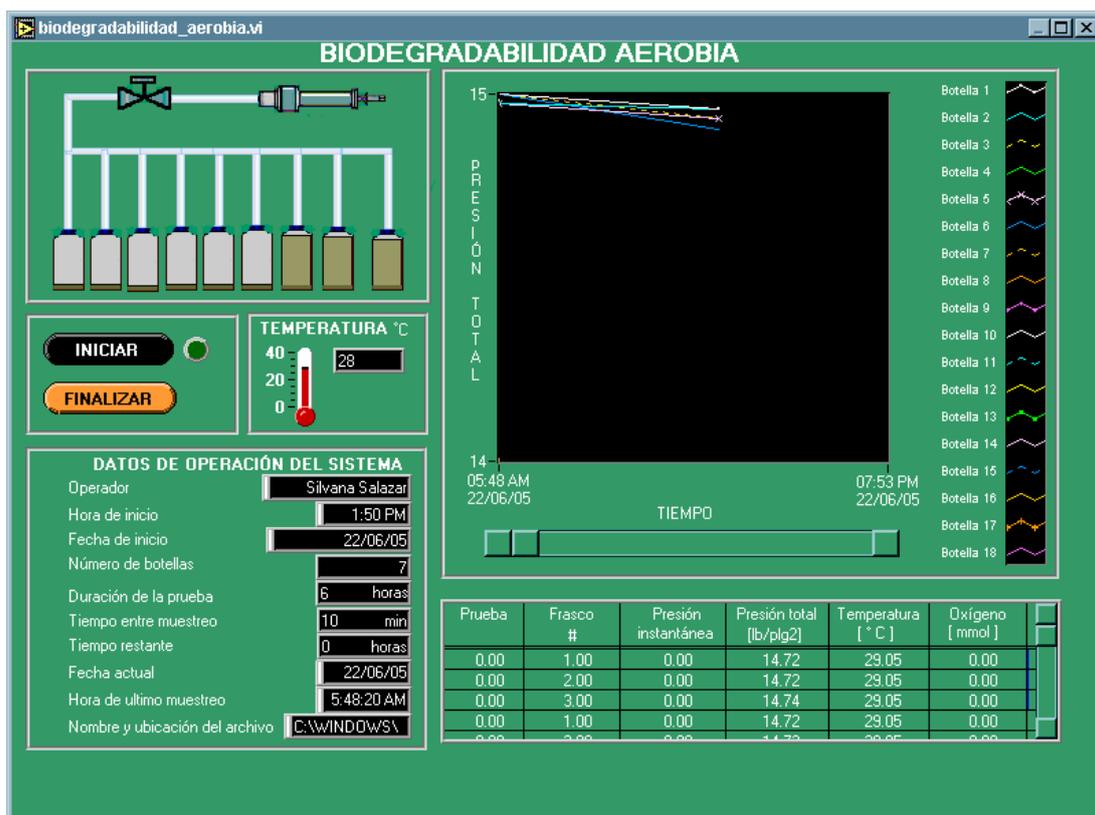


Figura 3.23 Prueba de calibración realizada de manera manual.

3.4.2 Prueba exploratoria sin compensación de presión

Esta prueba consistió en la puesta en marcha del equipo con la relación $0.5 \frac{\text{mg glucosa}}{\text{mg SSV}}$ que equivale a $0.5337 \frac{\text{mg DQO}}{\text{mg SSV}}$ en la relación de volúmenes $F_{\text{gas}}/F_{\text{liq}} = 100/150$ y sin compensación de presión después de cada medición. En este caso la prueba resultó satisfactoria, pues para ser una primera versión del sistema se obtuvieron buenos resultados, en la figura 3.24, se muestra la pantalla generada en esta prueba.

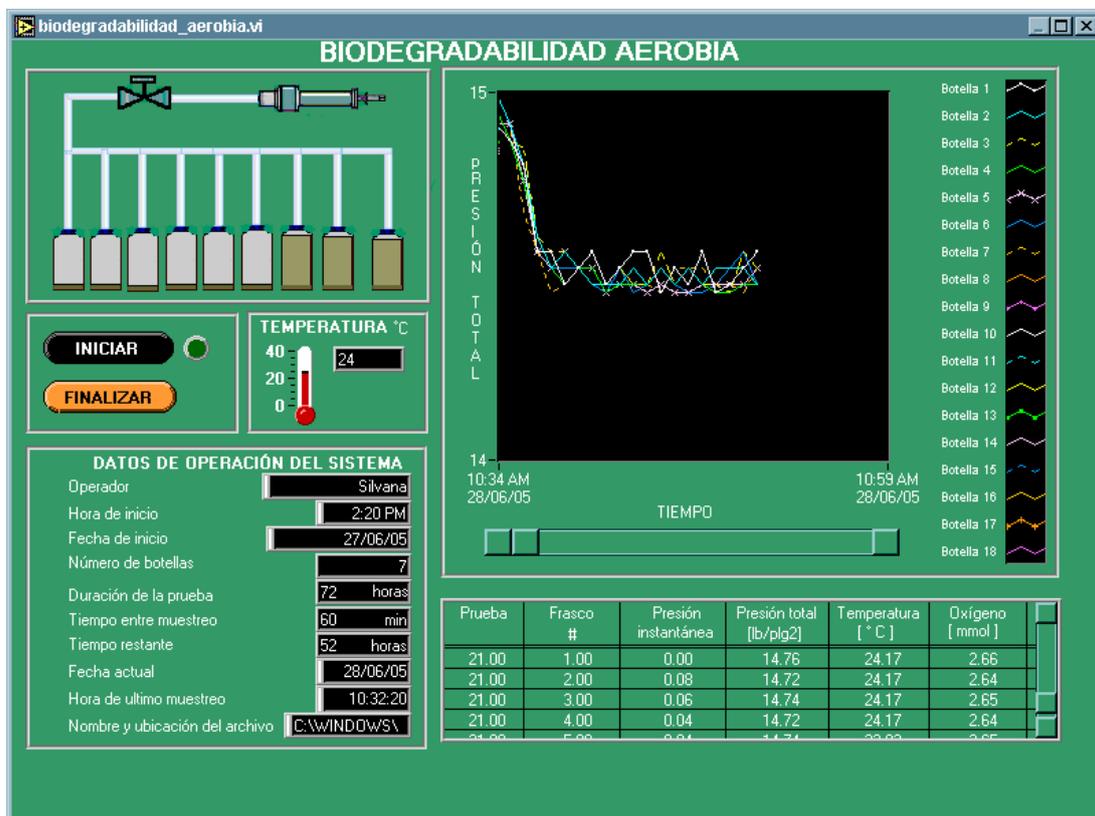


Figura 3.24 Pantalla generada en la prueba $S_0/X_0=0.534 \text{ mg DQO/ mg SSV}$ en una relación de volumen $F_{\text{gas}}/F_{\text{liq}}=125/100$ sin captura de aire.

Para comprobar los datos obtenidos por el equipo, se trabajaron los datos y se encontró un pequeño error en la fórmula del programa al realizar las operaciones para determinar los

decrementos de presión. El error presentado se debía a una equivocación en un signo en la fórmula.

Sin embargo, al trabajar estos datos en EXCEL[®], se obtuvo la siguiente gráfica (figura 3.25) para el monitoreo de los 7 reactores, ella puede verse claramente el decremento de presión, tal como se había previsto en el capítulo 3.

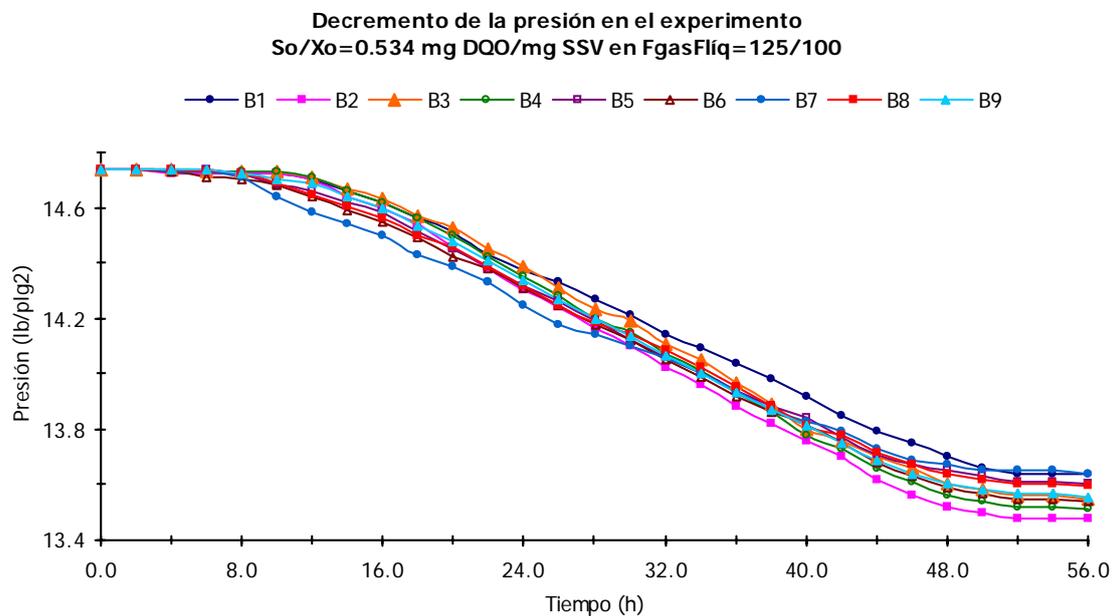


Figura 3.25 Gráfica con corrección de fórmula en la prueba $S_o/X_o=0.534$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volumen $F_{gas}/F_{liq}=125/100$ sin compensación de presión.

Finalmente para comprobar la repetibilidad en esta prueba, se calculó la media y la desviación estándar de los datos, obteniendo un coeficiente de variación de 3.08%. En la figura 3.26, la gráfica de la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación obtenido.

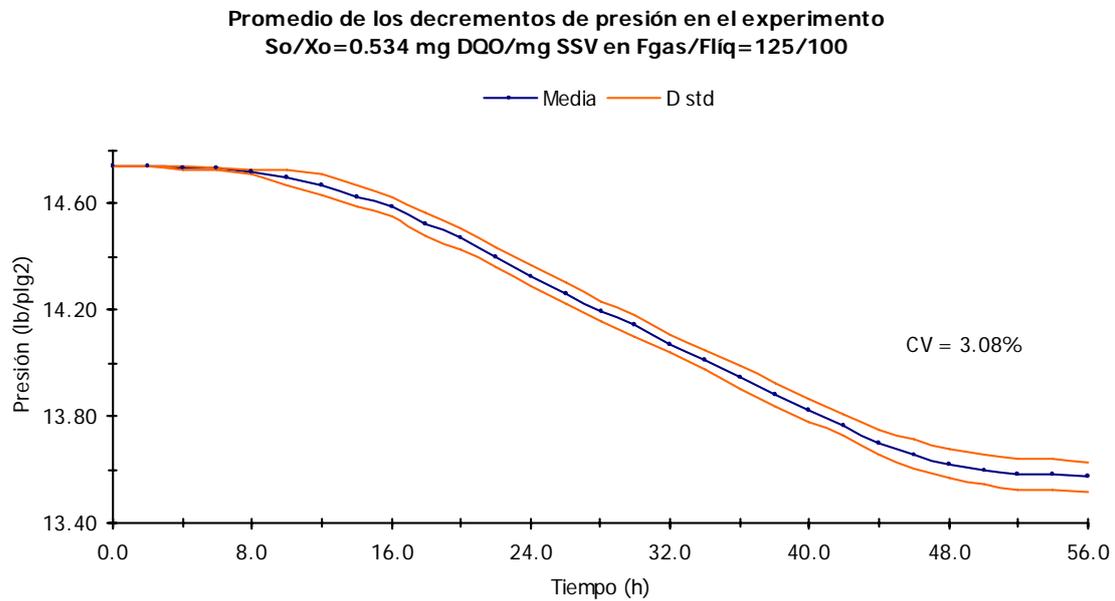


Figura 3.26 Gráfica de la media de los decremento de presión en la prueba $S_o/X_o=0.534$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volumen $F_{gas}/F_{liq}=125/100$ sin compensación de presión.

3.4.3 Prueba exploratoria con compensación de presión

Esta prueba se realizó bajo las mismas condiciones que la prueba anterior, con la instrucción de compensar la presión después de la medición en cada reactor, es decir con introducción de aire y tratando de mantener la presión atmosférica.

En este caso, los resultados no fueron satisfactorios puesto que los datos obtenidos son muy irregulares y no permiten visualizar que es lo que sucede durante el proceso de la prueba de biodegradabilidad.

En la figura 3.27, se muestra la pantalla generada durante esta prueba y en ella puede observarse una gran variación en los registros del sistema

De la misma manera que en la prueba anterior, se realizó la corrección en la fórmula para calcular los decrementos de presión y resultados obtenidos, en la figura 3.28 se muestra la gráfica de las presiones ya corregidas.

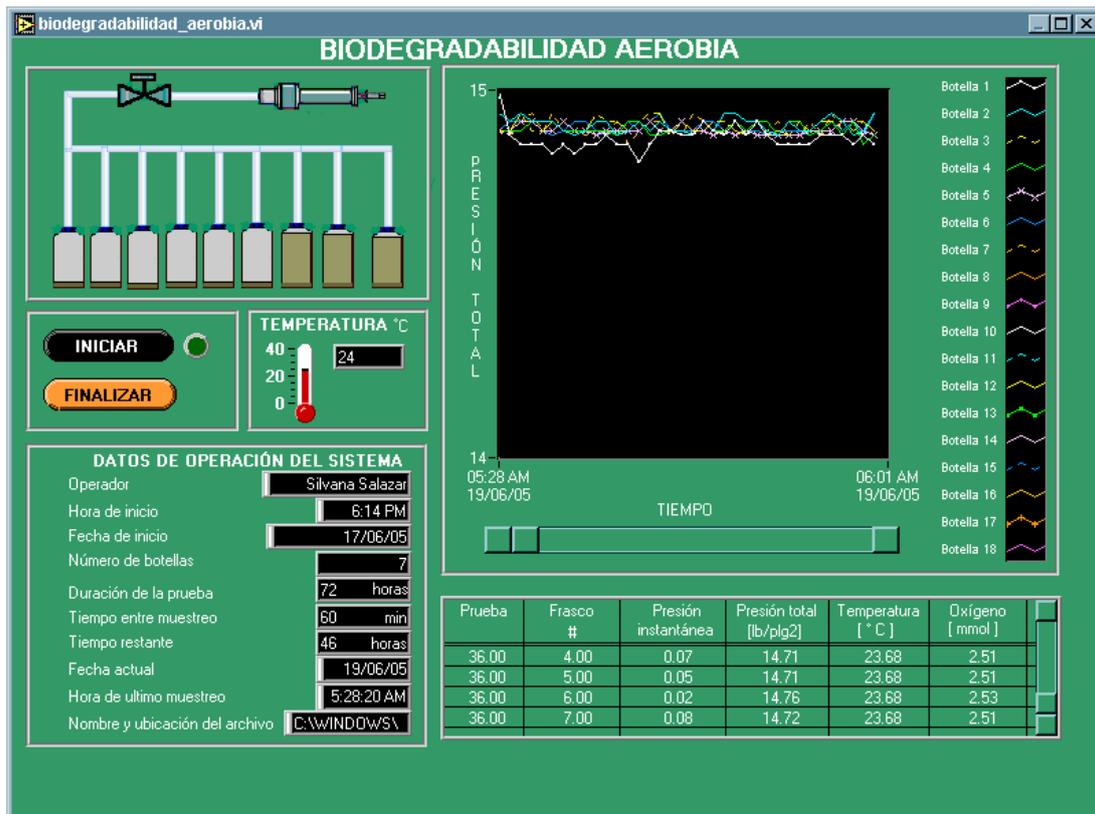


Figura 3.27 Pantalla generada en la prueba $S_o/X_o=0.534$ mg DQO/1000 mg SSV en una relación de volumen $F_{gas}/F_{liq}=125/100$ con captura de aire.

De igual manera que en la prueba anterior se determinó la media y la desviación estándar, después de corregir la fórmula del decremento de presión en los 7 reactores monitoreados, obteniendo un coeficiente de variación con un valor de 14.45 %.

La figura 3.27, muestra la gráfica de la media con la desviación y el valor del coeficiente de variación, que como puede observarse es bastante alto.

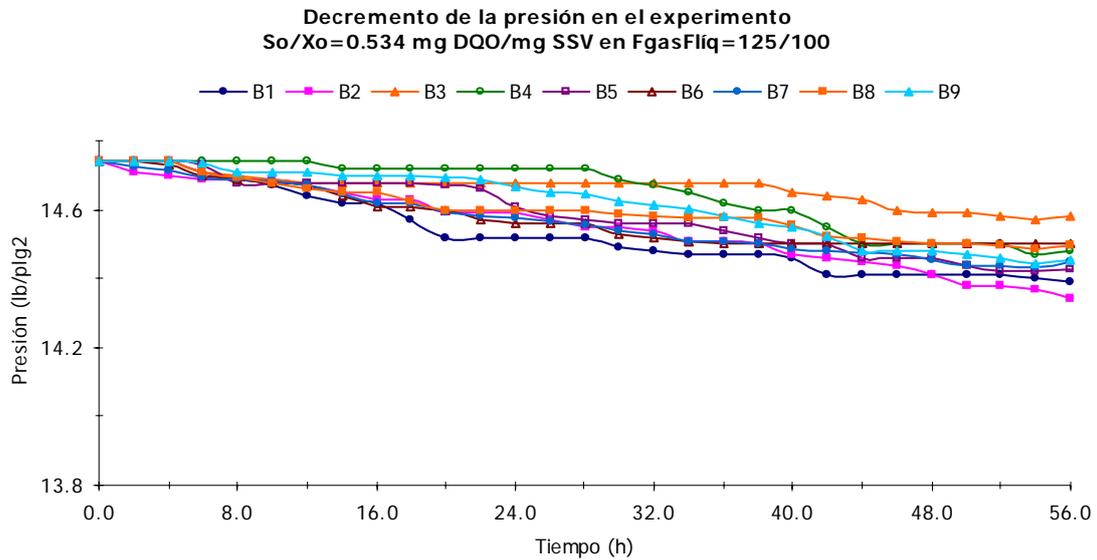


Figura 3.28 Gráfica con corrección de fórmula en la prueba $S_o/X_o=0.534$ mg DQO/1000 mg SSV en una relación de volumen $F_{gas}/F_{liq}=125/100$ con compensación de presión.

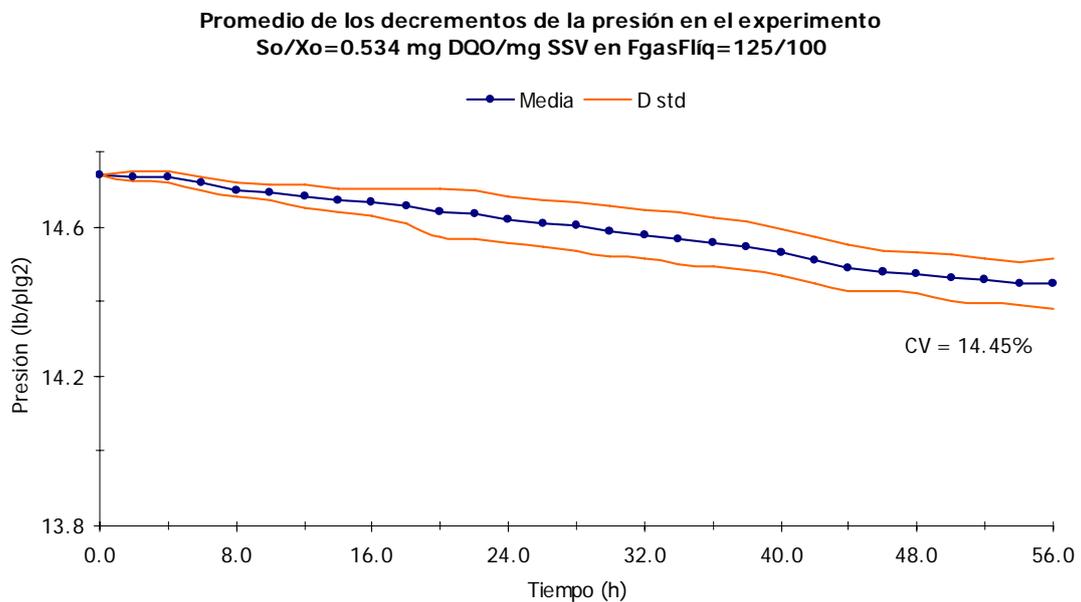


Figura 3.29 Gráfica de la media de los decremento de presión en la prueba $S_o/X_o=0.534$ mg DQO/ mg SSV en una relación de volumen $F_{gas}/F_{liq}=125/100$ con compensación de presión.

3.4.4 Discusión de resultados

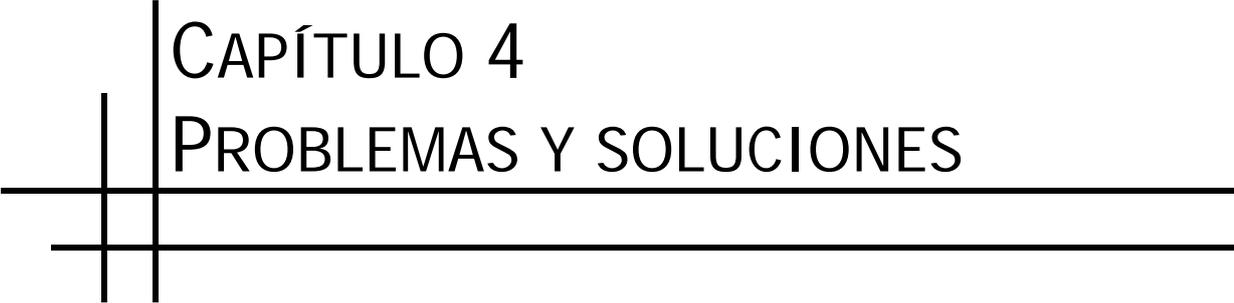
A partir de los resultados obtenidos por Strotmann *et al* (2003), en los sistemas, OxiTOP® y OxiDIRECT® se tienen coeficientes de variación de 0.43 y 0.35%, respectivamente, a los seis días de operación. Estos valores están por debajo de los obtenidos con las pruebas exploratorias, en este estudio. Para la prueba exploratoria sin compensación de presión, se obtiene un CV=3.08 % y para la prueba exploratoria con compensación de presión, se tiene un CV=14.45%, ambos, en un periodo de dos días de operación con el sistema propuesto.

La diferencia entre los coeficientes de variación de los resultados obtenidos y los reportados por Strotmann *et al* (2003), puede deberse a dos situaciones. Una de ellas enfocada al origen del inóculo, como Strotmann *et al* (2003) mencionan para ambas pruebas exploratorias (sin y con compensación de presión), y otra en función de la saturación que sufre el KOH en el depósito del reactor aerobio durante la prueba con compensación de presión.

Strotman *et al* (2003), comentan que los inóculos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales muestran un potencial de biodegradación más alto que lo inóculos de origen de plantas de tratamiento de aguas municipales. No obstante, en los ensayos reportados en su estudio encontraron resultados opuestos. Esto posiblemente debido a una mayor diversidad de microorganismos presentes en una planta de tratamiento de aguas municipales, contrariamente a la selección de microorganismos que ocurre durante la operación de una planta de tratamiento de aguas industriales. Debe recordarse que en este estudio fue utilizado inóculo proveniente de la planta de tratamiento de aguas municipales de Ciudad Universitaria y que los resultados obtenidos, pruebas con tiempos de duración de dos días, coinciden con lo que reportado por Strotman *et al* (2003).

En el caso de la saturación del KOH en la prueba exploratoria con compensación de presión, puede atribuirse a que el bióxido de carbono, presente en el aire, satura más rápido el KOH en el depósito del reactor. Lo que ocasiona que se neutralicen las presiones dentro del reactor y a su vez, no sea posible para el sistema determinar la disminución de presión.

Sin embargo, a pesar de tener resultados mayores a los reportados por Strotman *et al* (2003), no son resultados desalentadores, pues un coeficiente de variación del 3.08% para una primera versión, puede considerarse aceptable. Esto, da pauta a pensar que en una segunda versión se mejore la repetibilidad del sistema.



CAPÍTULO 4

PROBLEMAS Y SOLUCIONES

4.1 Problemática en el desarrollo

Durante el desarrollo del sistema, considerado como un prototipo se presentaron diversos problemas de tipo técnico y experimental. Muchos de ellos, se desconocían por completo, es por ello que surge este capítulo, una guía para la detección y resolución de cada uno de los problemas presentados. De acuerdo a la frecuencia y dimensión de cada uno de ellos, en el presente capítulo se clasifica, detalla y menciona la manera en que fueron resueltos cada uno de ellos.

Uno de los problemas más comunes durante la parte experimental, fueron las fugas y sobre todo la detección de las mismas, debido a la cantidad de mangueras (ductos) y conexiones con las que cuenta el sistema. Posteriormente, otro problema detectado durante la operación del equipo, fue el calentamiento del sistema, muy relacionado con la configuración de las válvulas solenoides.

Finalmente, se presenta un organigrama para la detección de problemas en el sistema, que pretende ayudar a los siguientes usuarios del equipo o en las futuras mejoras al sistema.

4.2 Fugas

Como ya se mencionó en la descripción del sistema, éste cuenta con mangueras a las que son conectadas los frascos graduados utilizados como mini reactores, asimismo también cuenta con 3 válvulas multiplexoras en la parte interna del gabinete, entre ellas hay varias conexiones entre válvulas y mangueras; por lo que la presencia de fugas en estas uniones es frecuente.

4.2.1 Reactores

Los frascos graduados utilizados como mini reactores durante la prueba de biodegradabilidad fueron adaptados con dos pequeñas olivas en la parte superior de las tapas para poder ser conectadas al sistema. A pesar de que las olivas cuentan con una cuerda que permite adaptarse al diámetro de la manguera y de ser piezas hechas sobre medida, es necesario usar o-rings (pequeños empaques) de hule en la parte interna y externa de la tapa para sellar por completo esa unión.

El problema presentado radica en la degradación que sufren los o-rings al ser expuestos a la temperatura y humedad, dos factores inevitables durante el desarrollo de las pruebas de biodegradabilidad, por lo que la solución es la revisión del estado de los o-rings y su cambio después de un prolongado uso del equipo. En la figura 4.1, puede observarse el perfil de la tapa de un reactor, señalando los o-rings externos en la tapa de un reactor anaerobio

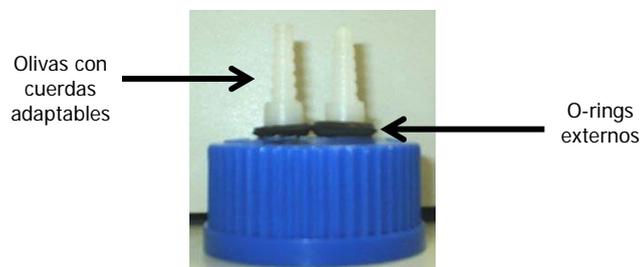


Figura 4.1 Tapa de reactor anaerobio de perfil con o-rings nuevos.

4.2.2 Válvulas y conexiones

El equipo está integrado por un arreglo de válvulas solenoides, las cuales se clasifican como multiplexoras y solenoide directa.

La diferencia principal entre las válvulas multiplexoras y las solenoides directas, es que las primeras cuentan con una válvula de salida para varias válvulas de entrada. En contraste con las válvulas solenoides directas, que solamente tienen una entrada, una salida y un puerto o entrada auxiliar para un sensor, que en nuestro caso se utiliza para el sensor de presión.

En el caso de las conexiones de la válvula solenoide directa, a pesar de contar con conectores especiales, conocidos en el mercado como "conectores rápidos directos", y manguera de un diámetro especial para dichos conectores, de la misma compañía, se presentan fugas en estas conexiones. Esta situación puede darse casi imperceptiblemente, pues un ligero movimiento que provoque una mala posición de la manguera en el conector y se genera una fuga en piezas que no han sufrido daño alguno, sólo están ligeramente fuera de lugar.

Es necesario saber que, las partes de la válvula multiplexora en contacto con la humedad están hechas de teflón para prevenir la bobina. Sin embargo, aunque el teflón es un material que soporta temperaturas de hasta 300°C, resistente a la mayoría de los ácidos y bases, es propenso a sufrir deformaciones en su estructura física por esfuerzos maleables. Debido a esta facilidad de deformación, es muy común que se presentan fugas en los orificios encordados a los que se atornillan los conectores y olivas.

En la figura 4.2 se muestran fotografías del arreglo de válvulas solenoides del gabinete del sistema anaerobio y aerobio. En estas imágenes, se indica como: **SD**, Válvula solenoide directa; **MA**, Válvula multiplexora A; **MB**, Válvula multiplexora B; **MU**, Válvula multiplexora unificadora y con una figura simulando una pequeña explosión en tono amarillo, los puntos más frecuentes de fugas en cada válvula.

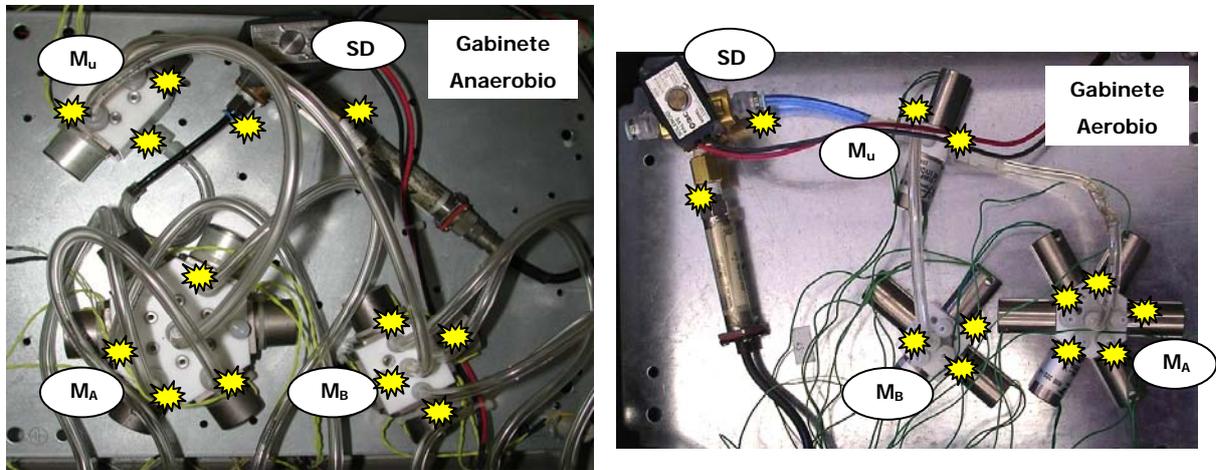


Figura 4.2 Puntos de fuga arreglo de válvulas en los gabinetes del sistema.

4.2.3 Calentamiento en el sistema

Como se mencionó en el capítulo 1, una prueba de biodegradabilidad se mantiene en monitoreo durante un periodo máximo de 28 días continuos o hasta la degradación del 60% de la sustancia, lo que suceda primero. Es comprensible que, si el equipo está en funcionamiento todo ese tiempo, debe de evitarse el calentamiento de toda la parte de hardware del sistema, que se encuentra en el interior de un gabinete metálico con poco espacio para la ventilación.

En esta eventualidad se estudiaron dos puntos clave posibles de calentamiento en el gabinete, una de ellas en la ubicación de la IAS y la otra la configuración de las válvulas solenoides.

4.2.3.1 Disipadores de calor en la IAS

La ubicación física de la IAS, es dentro del gabinete en la parte inferior, por lo que la entrada de aire es mínima y el calor generado por el arreglo de válvulas que se encuentra en la parte superior del gabinete contribuye a la acumulación de calor en esta parte. Para resolver este problema, fue necesario colocar disipadores de calor adicionales a la IAS, principalmente en el gabinete del sistema anaerobio. La figura 5.3 muestra la fotografía de la IAS y con unos círculos en color rojo la ubicación de los disipadores de calor adicionales.

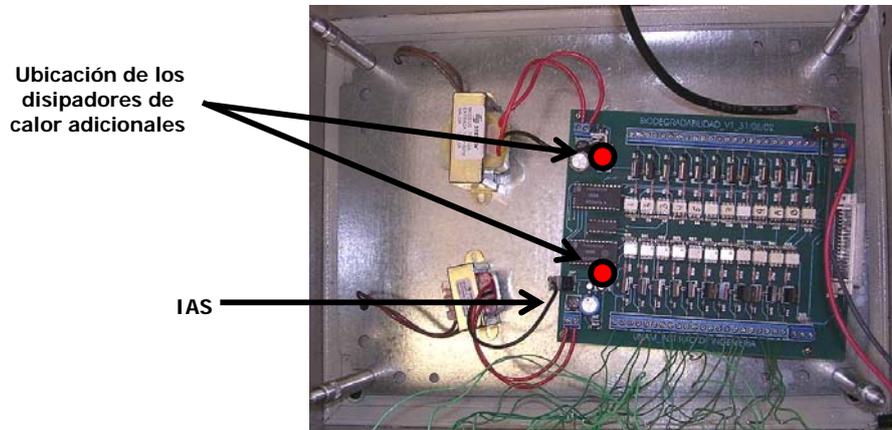


Figura 4.3 Ubicación de los disipadores de calor adicionales.

4.2.3.2 Configuración de válvulas multiplexoras

Como se puede observar en la figura 4.2, el equipo cuenta con dos válvulas multiplexoras, M_A y M_B , que funcionan alternadamente en conjunto con M_U , la cual se une con SD , la válvula solenoide directa y el sensor de presión.

Por la misma mecánica del arreglo de válvulas en el sistema, la válvula M_U , es la que trabaja más que las demás. A partir de esta situación, aquí surge una solución al problema presentado y al mismo tiempo dos recomendaciones.

La solución en este caso fue la instalación de ventiladores frente a la válvula M_U , para enfriarla un poco durante la operación. El pequeño ventilador comercial colocado, en cada uno de los gabinetes del sistemas, es de la marca STEREN[®] de 127 volts.

Por el lado de las recomendaciones, se tiene que al ampliar el tiempo de muestreo, se reduce el trabajo de la válvula y por lo tanto se evita un calentamiento prolongado. La más conveniente y duradera a largo plazo, es buscar una mejor configuración de válvulas multiplexoras, buscando que el calentamiento sea el mismo en cada una de ellas, por ejemplo, al colocar 4 válvulas

multiplexoras de tres entradas por una salida en ambos gabinetes. La figura 4.4 muestra la fotografía del ventilador colocado en el gabinete.

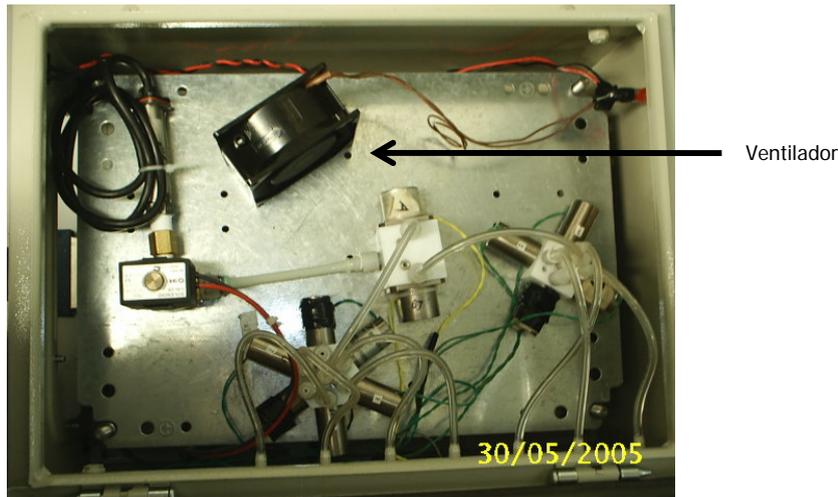


Figura 4.4 Ventilador en gabinete del sistema aerobio.

4.3 Detección de errores en el sistema

Durante el desarrollo de este proyecto se encontraron muchas eventualidades, algunas sencillas, algunas complicadas. Sin embargo, lo que se debe destacar aquí es la resolución de cada una de estas eventualidades, siempre a tal grado su persistencia y frecuencia de aparición que el organigrama presentado en la figura 4.5, es una guía en la detección y resolución de cada uno de los problemas presentados en el sistema. En el cual, la instrucción de inicio refiere al organigrama presentado en la figura 2.3 del capítulo 3.

Con la más sincera intención de mejorar, se clasifican éstas eventualidades de acuerdo a su importancia y su frecuente aparición durante el desarrollo experimental.

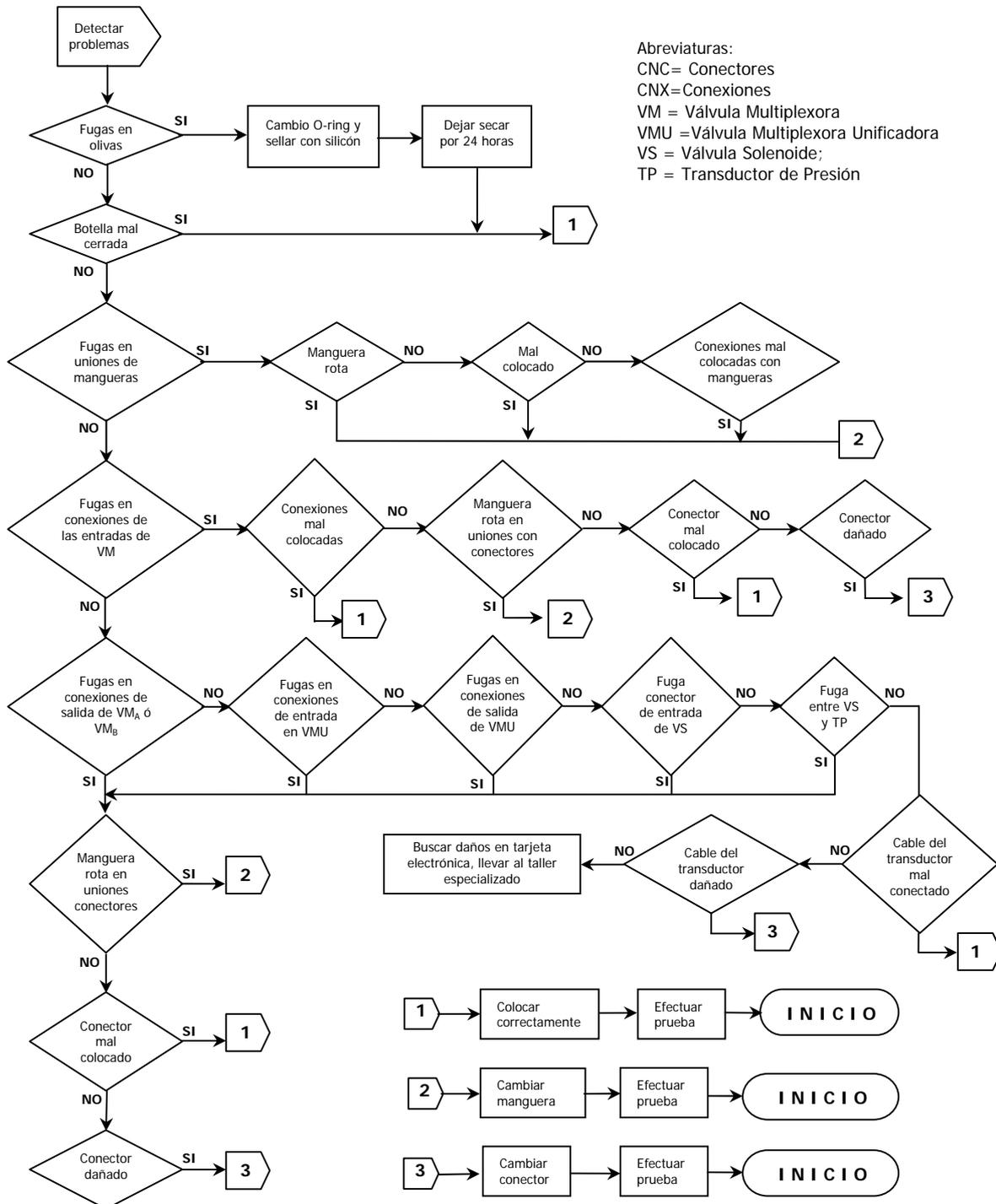


Figura 5.5 Organigrama para la detección de errores en el sistema.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

A partir de los resultados observados en este proyecto, se puede concluir lo siguiente:

- Se implementó en un solo equipo las pruebas de biodegradabilidad aerobia y anaerobia con una fácil operación, tecnología propia y la obtención de resultados precisos.
- Es evidente que al automatizar las pruebas de biodegradabilidad, se aventaja en puntos como la repetibilidad de los resultados, precisión, tiempo y costo de las pruebas. Pues son respetados los tiempos de muestreo, sin importar la hora de los mismos, y tanto la repetibilidad del sistema como la precisión presentan valores alentadores en esta segunda versión.
- El coeficiente de variación para determinar la repetibilidad del sistema tiende a disminuir con respecto a la disminución de volumen en la fase líquida de los reactores y su tiempo de duración del experimento. Esto es, a menor fase líquida menor coeficiente de variación, posiblemente, a problemas de mezclado entre la biomasa y el sustrato en un volumen mayor.

- Se observó que la precisión del sistema también está directamente relacionada con las relaciones de volumen, esto se demostró al obtener menores porcentajes de error a volúmenes menores de la fase líquida en los reactores, con una misma relación de S_0/X_0 .
- Al ensayar distintas relaciones de sustrato – microorganismo, fue posible determinar un límite de detección del sistema, en una relación de $0.1067 \frac{\text{mg DQO}}{\text{mg SSV}}$. Este punto le da un valor agregado al sistema propuesto, dado que no hay mucha información al respecto de los equipos comerciales, presentados en el capítulo 1 en la sección 1.7.
- El sistema aerobio, en las pruebas exploratorias, mostró mejores resultados sin compensación de presión, probablemente debido a la sobresaturación de las grageas del KOH colocadas dentro del depósito del reactor para contrarrestar las interferencias que provoca la producción de CO_2 . Es decir, al permitir la compensación de presión, se agota el KOH en el depósito y lentamente se van neutralizando las presiones.
- En cuanto a los costos del sistema completo, que se muestran en el apéndice III, se puede decir, que se obtuvo un producto confiable comparado con equipos que sólo ofrecen la determinación de biodegradabilidad en un sentido, aerobio o anaerobio.
- Es necesaria la revisión de las piezas que conforman los reactores, pues después de un uso prolongado presentan desgaste en piezas como los O-rings.

5.2 Recomendaciones

- La continuidad en esta línea de investigación, resulta muy importante, puesto que hay poca información con respecto a este tipo de equipos y sobre todo para profundizar en características más definidas en la medición de los mismos (límite de detección, repetibilidad, precisión, mejores relaciones de volumen, etcétera).

- Es recomendable estudiar la posibilidad de utilizar un transductor de presión con un rango de medición más pequeño, esto con la intención de mejorar la repetibilidad, precisión y en particular el caso de la sensibilidad en el sistema, que está muy determinada por la sensibilidad del transductor de presión. Ya que, la sensibilidad del transductor en este sistema es de 3% sobre la medición.
- Para evitar el calentamiento y el desgaste disparado en las válvulas multiplexoras del sistema, se recomienda probar una configuración de válvulas que permita un trabajo mecánico equitativo en ellas. Por ejemplo, para el monitoreo de 9 reactores en línea, se podrían utilizar tres válvulas multiplexoras de tres entradas por una salida; y a su vez una válvula multiplexora unificadora con la solenoide directa, también de tres entradas por una salida. De esta manera, el trabajo mecánico es el mismo para todas, lo que prolongaría la vida útil de las válvulas y evitaría el calentamiento excesivo en algunas de ellas.
- A pesar de contar con un gabinete que protege el arreglo de válvulas y la IAS, es necesario tener cuidado en la manipulación del gabinete para no provocar daños en el sistema de medición (arreglo de válvulas), conexiones y en particular evitar la generación de fugas
- Para el sistema aerobio, se recomienda una profundización sobre las relaciones a ensayar y principalmente el estudio del límite de detección y la precisión en las mediciones del sistema. Pues con pruebas exploratorias no es posible, determinar todas ventajas del equipo propuesto y se puede mejorar la repetibilidad del mismo.
- Es muy recomendable, en caso de fallas en el sistema, la consulta del organigrama para la detección de errores en el sistema que se encuentra en el capítulo 4, sección 4.3.

REFERENCIAS

- 📖 Ahtiainen J., Aalto M. y Pessala P. (2003). Biodegradation of chemicals in standardized test and in environmental conditions. *Chemosphere*. **51**, 529-537.
- 📖 Albert L.A., López S.M., Flores J. *Diccionario de la contaminación*. Centro de Ecología y desarrollo. 1995, México D.F., 85 pp.
- 📖 Ambríz-Rivas K.T. (1998) Tesis de licenciatura en QFB "*Estudio de y aplicación de las pruebas OECD 301-A'*". UNAM.
- 📖 Angelidaki I., Schmidt J.E., Ellegaard L., Ahring B.K., (1998) *An automatic system for simultaneous monitoring of gas evolution in multiple closed vessels*. *J Microbiol Meth.* **33**, 93-100.
- 📖 APHA, AWWA, WPCF. (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater. American public health association. 20th edition. USA. 1-3 pp.
- 📖 Buitrón G. (2002). Some factors that influence the biodegradability, test results. Workshop on harmonization of anaerobic biodegradation, activity and inhibition assays. 139-142.

- 📖 Buitrón G., Santiago L., Moreno-Andrade I., Valera C. (2002) *Equipo para la determinación de la biodegradabilidad anaerobia*. Memorias VII Taller y simposio Latinoamericano sobre digestión anaerobia. 119-122.
- 📖 Calmon A., Dusserre-Bresson L., Bellon-Maurel V., Feuilloley P., Silvestre F. (2000). *An automated test for measuring polymer biodegradation*. Chemosphere. **41**, 645-651.
- 📖 Cardinale P., Bookland E., Cowan C., Larson R. (1996). El significado de las pruebas de biodegradabilidad, y un ensayo recomendado para América Latina. XXV Congreso de AIDIS.
- 📖 Diario oficial de las comunidades europeas (1998) Informe especial No. 3/98 Sobre la aplicación por parte de la Comisión de la política y la actuación de la Unión Europea en el ámbito de las pruebas de biodegradabilidad y su importancia. [En línea] Capítulo I: Aplicación de las Directivas. [citado 20 Ene 2006] Disponible <http://www.ucm.es/BUCM/be/legis/doce/es/main/>
- 📖 Figliola R.S., Beasley D.E. *Mediciones, teoría y diseño*. 3ra edición. Alfaomega. 2003, México 2 pp.
- 📖 Gutiérrez P.H., *Análisis y diseño de experimentos*. 1ra edición. Mc Graw Hill. 2004, México, 10-11 pp.
- 📖 http://chemie.uni-lueneburg.de/wtw/bsb_e.pdf *Manual del equipo OxiTop® para la determinación de la DBO de la WTW*. Measurement Systems, Inc.
- 📖 <http://industry.biomerieux-usa.com/industry/food/bactometer/index.htm> *Información del equipo Bactometer® de bioMerieux Systems Inc.*
- 📖 http://www.lovibond.de/tintometer/english/e_g_sensomat.htm BOD - OxiDirect - BOD-Measurement System de Lovibond®

- 📖 Lefaux S., Manceau A., Benguigui L., Campistron I., Laguerre A., Laulier M., Leignel V., Tremblin G. (2004). Continuous automated measurement of carbon dioxide produced by microorganism in aerobic conditions: application to proteic biodegradation. *Chimie*. **7**, 97- 101.
- 📖 Mijaylova N. P., Ramírez Camperos E., Mendoza J., Rocha M. I., (1999). *Aerobic biodegradation of organic synthesis wastewater*. IAWQ Waste minimization and end of pipe treatment in chemical and petrochemical industries. 73- 80 pp.
- 📖 Moreno G., Buitrón, G. (1996). *Efecto de la composición del medio en la prueba de biodegradabilidad anaerobia*. En memorias del XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. **1** (2), 678-685.
- 📖 Moreno G., Cruz A., Buitrón G. (1997) *Influence os So/Xo ratio and medium composition on anaerobic biodegradability test*. 52nd Purdue industrial Waste Conference, Chapter 14, Ann Arbor Press. Michigan, 125-133 pp.
- 📖 Moreno-Andrade I. (2003). Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas "Influencia del origen del inóculo y de la relación inicial sustrato/microorganismo (S_0/X_0) en la prueba de biodegradabilidad anaerobia". UNAM.
- 📖 OECD, Detailed review paper on biodegradability testing. Paris 1995.
- 📖 Pagga U., Beiborn D.B., Boelens J., De Wilde. (1995). *Testing biodegradability with standardized methods*. *Chemosphere*. **31** (11/12), 4475-4487.
- 📖 Pagga U. (1997). *Testing biodegradability with standardized methods*. *Chemosphere*. **35** (12), 2953-2972.

- 📖 Posadas A.M. (2005). Determinación de errores y tratamiento de datos. [En línea] Facultad de ciencias experimentales, Universidad de Almería [Citado 13 Dic 2005] Disponible: <http://www.val.es/~aposadas/TeoríaErrores.pdf>
- 📖 Salanitro, J.P., Diaz, L.A., Krzvetz, L. (1995). Aerobic Biodegradability of surfactants and low concentrations using an automated pressure transducer system. *Chemosphere*. **31** (3), 2827-2837.
- 📖 Sánchez D. (2004) *Validación de métodos de análisis químico* [En línea] Universidad Distrital IDEAM [Citado 29 Enero 2006]. Disponible http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/estudiantes/dlilian/que_es_valid.htm
- 📖 Struijs J., Stolenkamp-Woulterse M.J., Dekkers A.L.M. (1995) *A rationale for the appropriate amount of inoculum in ready biodegradability test*. *Biodegradation*. **6**, 319-327.
- 📖 Struijs J., Van Den Berg R. (1995). Standardized biodegradability test extrapolation to aerobic environments. *Wat Res*. **29**(1) 255-62.
- 📖 Strotmann U., Reseuschenbach P., Pagga U. (2003). A critical comparison of respirometric biodegradation test based on OECD 301 and related test methods. *Water Research*. **37**, 1571-1582.
- 📖 Sydenham P.H. *Handbook of measurement science*. Vol.1, Theoretical fundamentals. Wiley & Wiley. 1982, USA. 53 pp.
- 📖 Van Laar H., Van Straalen W.M., Van Gerlder A.H., De Boever J.L., D'heer B., Vedder H., Kroes R., De Bot P., Van Hees J. y Cone J.W. (2006) *Repeatability and reproducibility gas production technique*. *Anim Feed Sci Tech*. **127** (1-2), 133-150

- 
 Žgajnar Gotvajn A., Zagorc-Končan J. (1996) *Comparison of biodegradability assessment tests for chemical substances in water*. *Wat Sci Tech.* **33** (6), 207-212.

- 
 Žgajnar Gotvajn A., Zagora-Končan J. (1999a). Simultaneous measurement of oxygen consumption and dioxide production: an estimation of mechanism of biodegradation in aquatic systems. *IAWQ Waste minimization and end of pipe treatment in chemical and petrochemical industries*. 57- 64 pp.

- 
 Žgajnar Gotvajn A., Zagora-Končan J. (1999b). *Biodegradation studies as an important way to estimate the environmental fate of chemicals*. *Wat Sci Tech.* **39** (10-11), 375-382.

APÉNDICE I

TÉCNICAS

AI.1 Determinación de sólidos suspendidos

Técnica basada en (APHA, 1992)

Los sólidos totales contenidos en aguas residuales son definidos como toda materia que permanece como residuo bajo evaporación de 103 a 105° Celsius.

Los sólidos suspendidos totales incluyen los sólidos suspendidos totales o porción de sólidos retenidas por un filtro y los sólidos suspendidos fijos, generalmente material orgánico.

El tipo de soporte del filtro, el tamaño del poro, la porosidad, el área y el espesor del filtro así como la naturaleza física y tamaño de las partículas y la cantidad del material depositado en el filtro son los factores que afectan la separación de los sólidos suspendidos.

Sólidos fijos es la expresión aplicada al residuo de los sólidos suspendidos totales después de someterse a ignición durante un tiempo determinado y a una temperatura específica, la pérdida de peso por ignición corresponde a los sólidos suspendidos volátiles.

Preparación de filtros

- Montar el sistema de vacío, poner el filtro sobre el sistema y hacer pasar 30 mL de agua destilada y después colocar el filtro en una laminilla de aluminio.
- Introducir los filtros a la estufa a 103°C durante una hora, después a 500°C en la mufla por 15 minutos.

Determinación de los sólidos suspendidos totales y volátiles

- Después de tener los filtros a peso constante, se registra el peso de los mismos, para considerar como el peso cero, es decir, sin muestra.
- Colocarlos en el sistema de vacío y pasar por ellos 10 mL de muestra de lodos cuyo volumen sea conocido.
- El residuo sólido que se depositó en ellos se introduce a la estufa a 103°C durante una hora, posteriormente se dejan enfriar en el desecador y se mide su peso en la balanza.
- Los sólidos suspendidos totales (SST) se determinan restando la masa del filtro después de la estufa al peso del filtro antes de la estufa, (el filtro a peso constante), y dividiendo entre el volumen de la muestra; se reporta en mg/L.
- Después el filtro con la muestra de lodos se introduce en la mufla a 550°C durante 15 minutos, se dejan enfriar en el desecador y se pesan.
- Finalmente, se registra el peso de estos y los sólidos suspendidos volátiles (SSV) son simplemente la diferencia entre el peso registrado después de la estufa y después de la mufla entre el volumen de la muestra; se reportan en mg/L.

AI.2 Preparación del medio mineral anaerobio

Composición de las soluciones para el cultivo de bacterias anaerobias (Balch *et al.*, 1979).

Soluciones minerales

La preparación de las soluciones minerales se puede llevar a cabo en condiciones aerobias, con agua destilada (neutralizada previamente con KOH), se debe preservar a 4°C.

Solución mineral 1 (1000 mL)

K_2HPO_4	6.0 g
------------	-------

Solución mineral 2 (1000 mL)

KH_2PO_4	6.0 g
------------	-------

NH_4Cl	2.4 g
----------	-------

$NaCl$	12.0 g
--------	--------

$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	2.1 g
----------------------	-------

$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	0.16 g
----------------------	--------

$CaCl_2$ (cuando no hay la anterior)	0.12 g
--------------------------------------	--------

Solución de vitaminas (1000 mL)

Biotina	2.0 mg
---------	--------

Ácido fólico	2.0 mg
--------------	--------

Piridoxina	10.0 mg
------------	---------

Tiamina	5.0 mg
---------	--------

Riboflavina	5.0 mg
-------------	--------

Ácido nicotínico	5.0 mg
------------------	--------

Pantotenato de calcio	5.0 mg
-----------------------	--------

Vitamina B_{12}	0.1 mg
-------------------	--------

Ácido p-aminobenzoico	5.0 mg
-----------------------	--------

Ácido lipoico	5.0 mg
---------------	--------

Solución de oligoelementos (1000 mL)

Ácido nitrilotriacético	1.5 g
Ajustar el pH a 6.5 con KOH antes de agregar lo siguiente	
MgSO ₄ · 7 H ₂ O	3.0 g
MnSO ₄ · H ₂ O	0.5 g
NaCl	1.0 g
FeSO ₄ · 7 H ₂ O	0.1 g
CoSO ₄	0.1 g
CoCl ₂ (cuando no hay la anterior)	0.1 g
CaCl ₂ · 2H ₂ O	0.1 g
ZnSO ₄	0.1 g
CuSO ₄ · 5 H ₂ O	0.01 g
AlK (SO ₄) ₂	0.01 g
H ₃ BO ₃	0.01 g
Na ₂ Mo ₄ · 2H ₂ O	0.01 g

Preparación del medio de nutrientes

Cantidades para preparar 1000 ml

Solución mineral 1	50 mL
Solución mineral 2	50 mL
Solución de vitaminas	10 mL
Solución de oligoelementos	10 mL
Resarzurina (0.1%) en agua destilada	1.0 mL
Extracto de levadura	1.0 g
Peptona de caseína	1.0 g
Bicarbonato de sodio	3.0 mg
Sol. FeSO ₄ · 7 H ₂ O (2%)	1.0 mL
Sol. NiCl ₂ (5 mg/100 ml)	10.0 mL
<i>Cisteína</i>	0.5 g

Procedimiento

- Colocar los reactivos excepto la cisteína en un matraz de 1000 mL (previamente lavados con una solución de HCl al 1%), aforar con agua destilada.
- Repartir el medio en dos matraces de 1000 mL y adicionar un excedente de 150 - 200 mL de agua destilada a cada matraz.
- Colocar dentro de cada matraz una jeringa sin aguja, conectada con una manguera a un sistema de distribución de gas (nitrógeno), mantener la jeringa por encima del nivel del líquido y tapar con papel aluminio.
- El medio se pone a calentar en una parrilla y una vez que comienza a ebullición se introduce la jeringa a una altura aproximada de 1.5 cm por debajo del nivel del líquido con una corriente de nitrógeno constante, hasta que el medio vire de rosa a incoloro (reducción completa).
- Se procura mantener en caso necesario, el volumen requerido con agua destilada hasta completar la reducción del medio.
- Una vez reducidos se enfrían en un recipiente con agua manteniendo la corriente de nitrógeno.
- Una vez tibio el medio (aproximadamente a 30 °C) se agrega la cisteína rápidamente dejándola caer por las paredes del matraz. Evitar en lo posible la introducción del aire, tapar y burbujear con la corriente de nitrógeno durante 10 minutos adicionales.
- Quitar la corriente de nitrógeno y tapar con un tapón de hule sellando el perímetro del matraz con cinta adhesiva. Dejar un extremo libre de la cinta para quitarlo una vez dentro de la cámara anaerobia.

- Esterilizar 15 minutos en autoclave a 15 lb/in².
- Medir el pH final (6.8-7.5).
- Guardar en la cámara anaerobia hasta el momento de inocular.

AI.3 Preparación del medio mineral aerobio

Solución A (para adición de 3 mL/L)

Sal	Peso (g)
KH_2PO_4 (Fosfato Monobásico de Potasio)	8.5
K_2HPO_4 (Fosfato Dibásico de Potasio)	10.875
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Fosfato Dibásico de Sodio Heptahidratado)	25.152
NH_4Cl (Cloruro de Amonio)	2.5

- Aforar a un litro con agua destilada.

Solución B (para adicionar 1 mL/L)

Sal	Peso(g)
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Sulfato de Magnesio)	8.67

- Aforar a un litro con agua destilada.

Solución C (para adicionar 1 mL/L)

Sal	Peso(g)
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Cloruro de Calcio Dihidratado)	36.4

- Aforar a un litro con agua destilada.

Solución D (para adicionar 1 mL/L)

Sal	Peso(g)
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Cloruro Férrico Hexahidratado)	0.25

- Aforar a un litro con agua destilada.

Solución E (para adicionar 1 mL/L)

Sal	Peso(g)
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (Cloruro de manganeso Tetrahidratado)	0.0353
H_3BO_3 (Ácido Bórico)	0.0572
ZnCl_2 (Cloruro de Zinc)	0.0203
$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ (Molibdato de Amonio)	0.0347
EDTA	0.0555
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Cloruro Férrico Hexahidratado)	0.0540

- Aforar a un litro con agua destilada.

APÉNDICE II

GRÁFICAS Y PANTALLAS

AII.1 Pantallas del sistema anaerobio relación $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/mg SSV en $F_{gas}/F_{liq}=50/200$

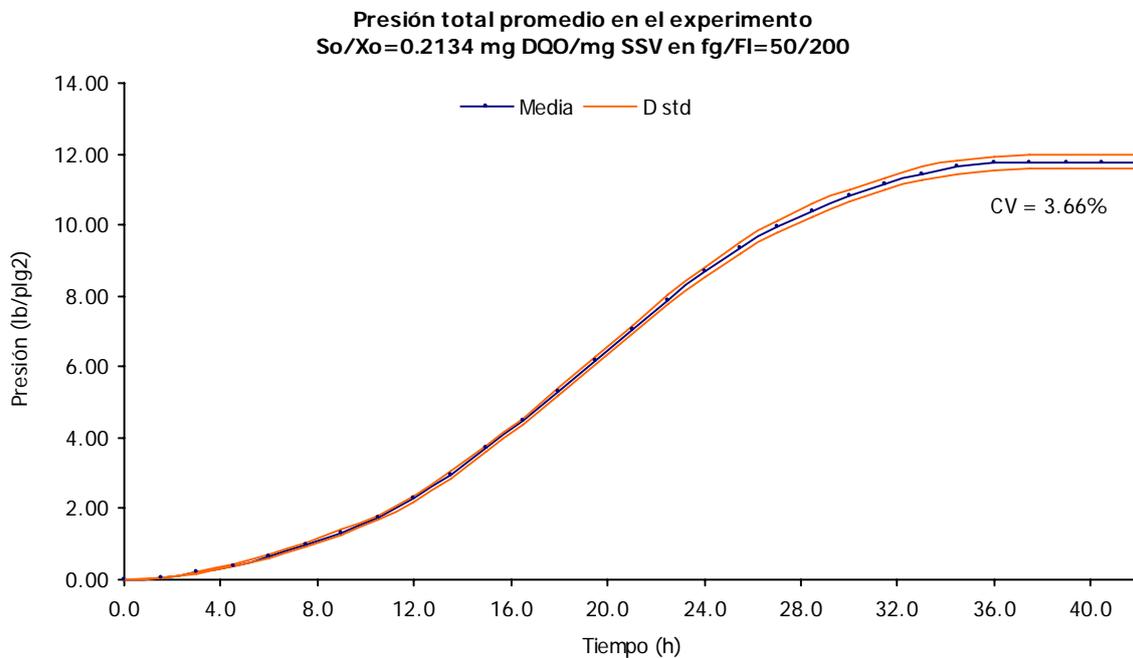


Figura AII.1 Presiones promedio del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

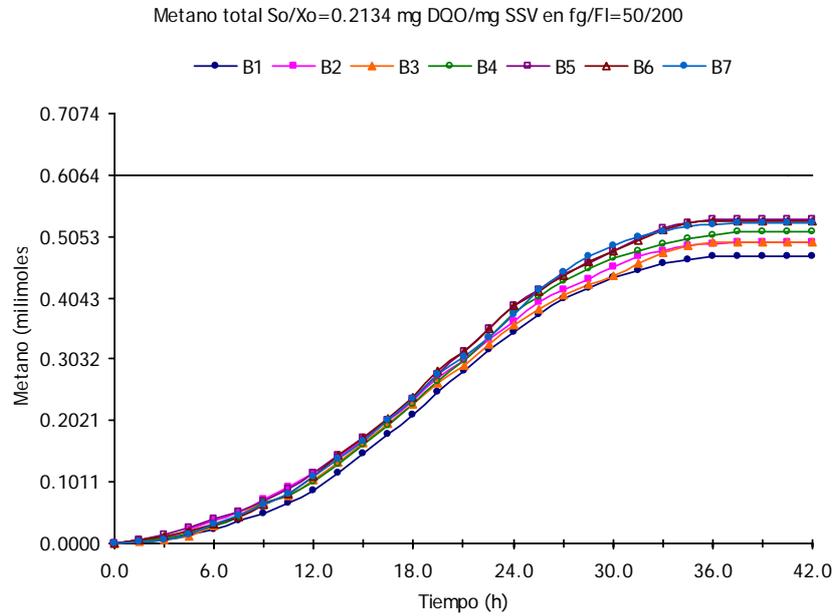


Figura AII.2 Metano total de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

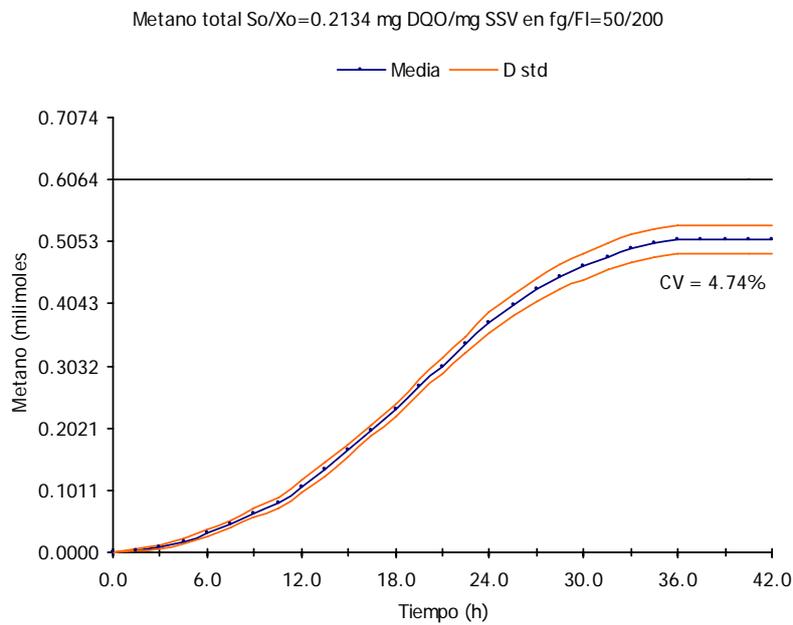


Figura AII.3 Metano total promedio de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

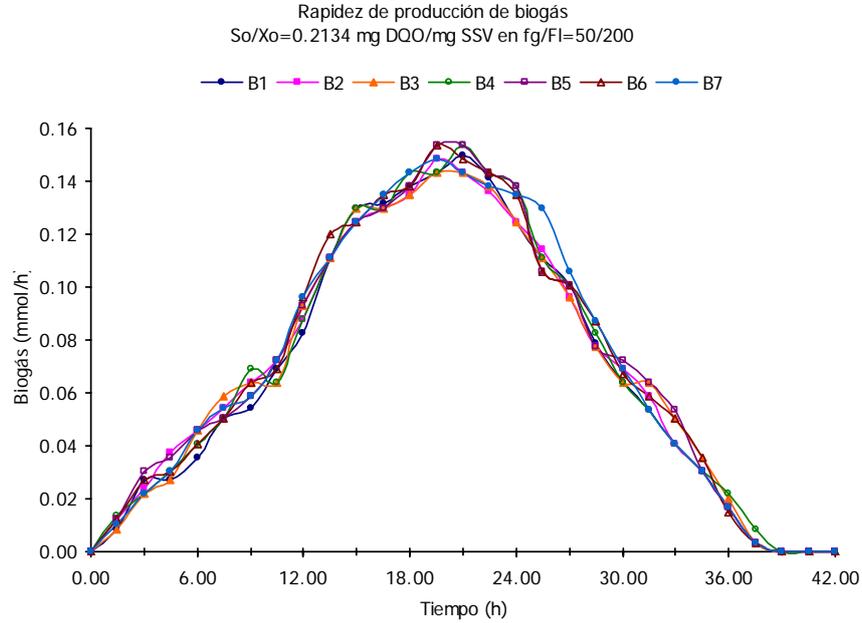


Figura AII.4 Rapidez de producción de biogás de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

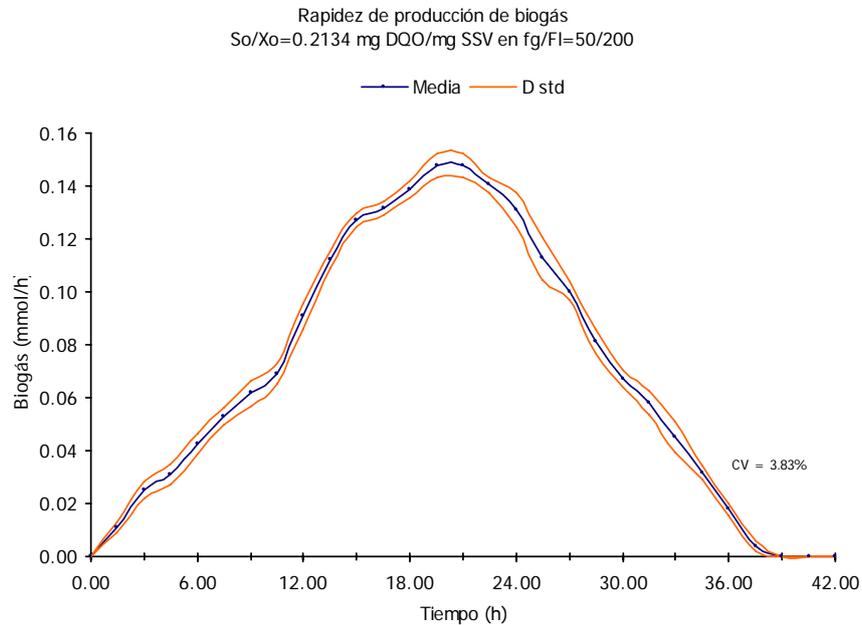


Figura AII.5 Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

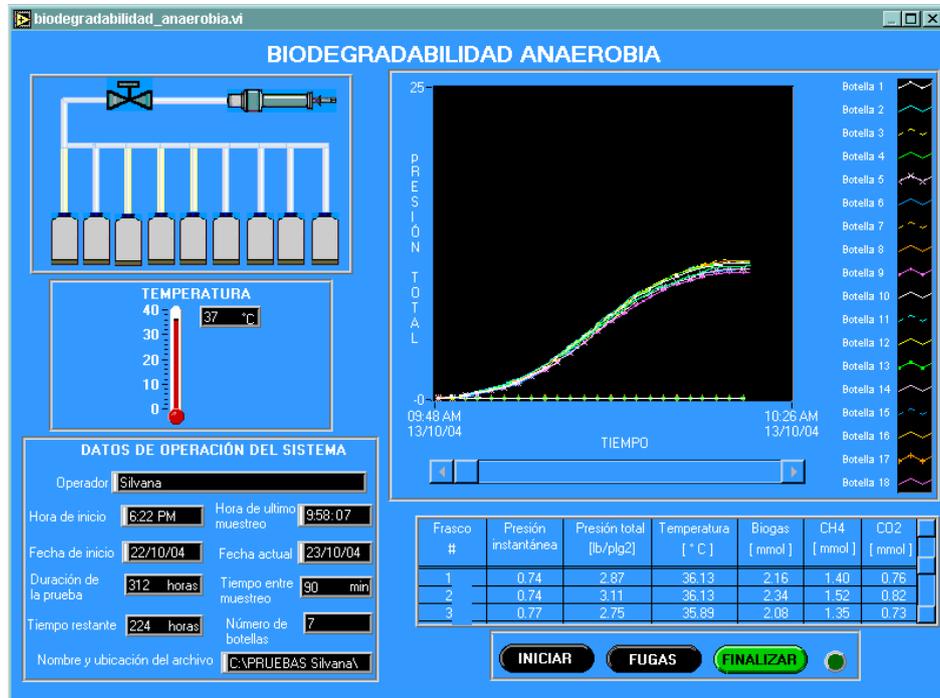


Figura AII.6 Pantalla del sistema anaerobio de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

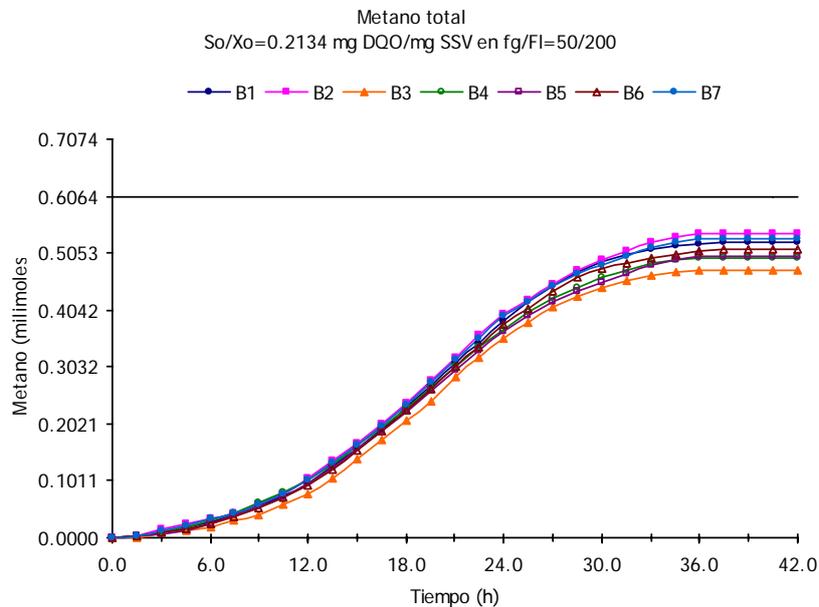


Figura AII.7 Metano total de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

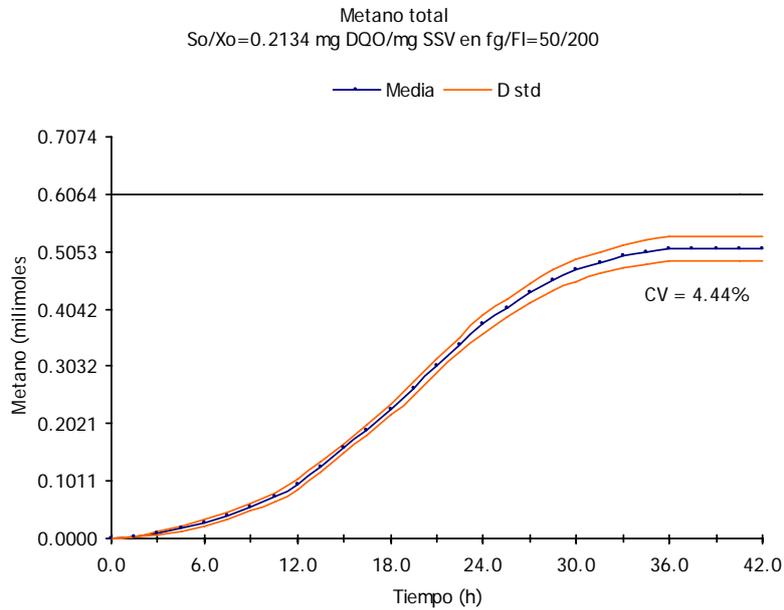


Figura AII.8 Metano total Presiones de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$

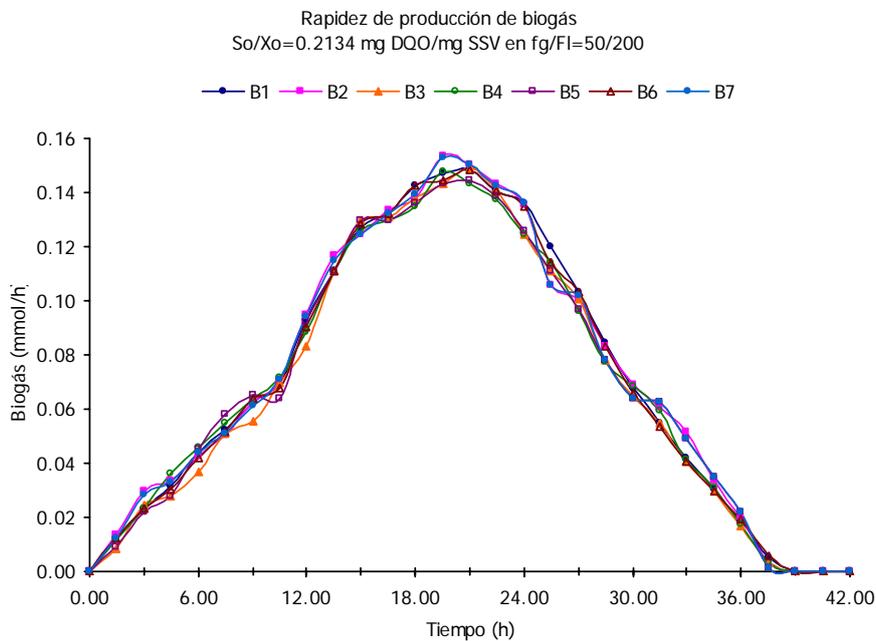


Figura AII.9 Rapidez de producción de biogás de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

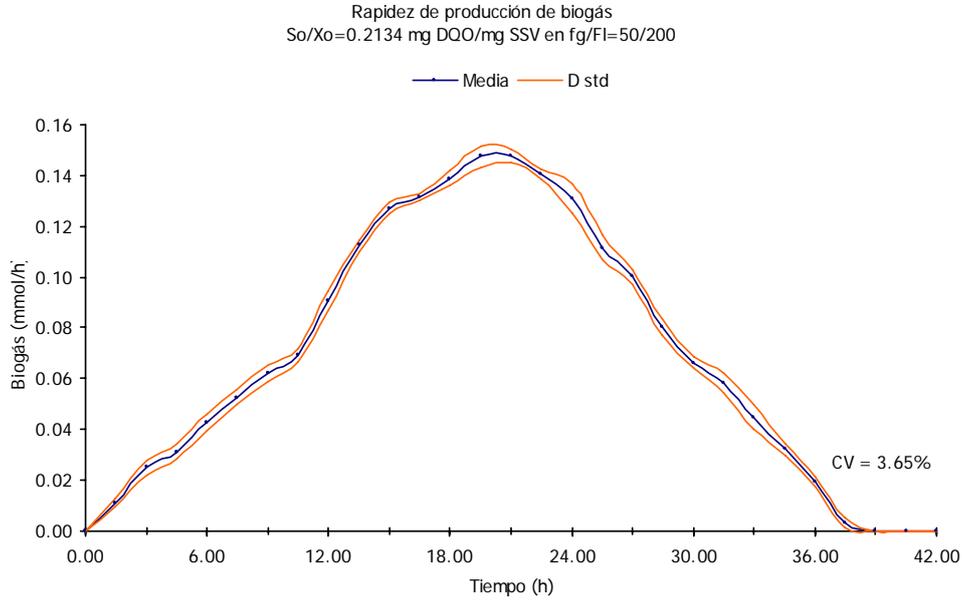


Figura AII.10 Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

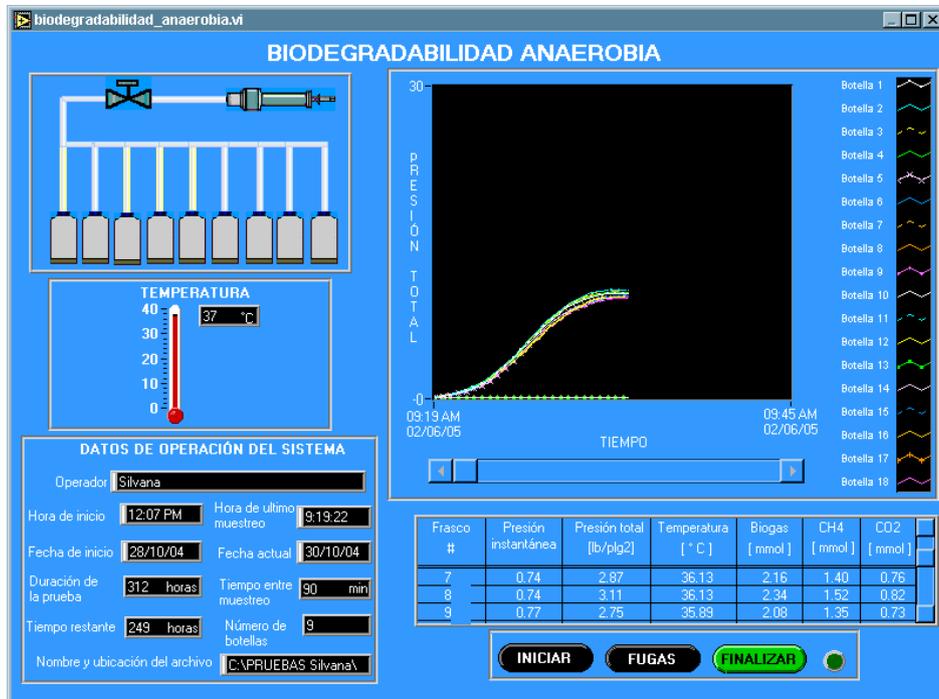


Figura AII.11 Pantalla del sistema anaerobio de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

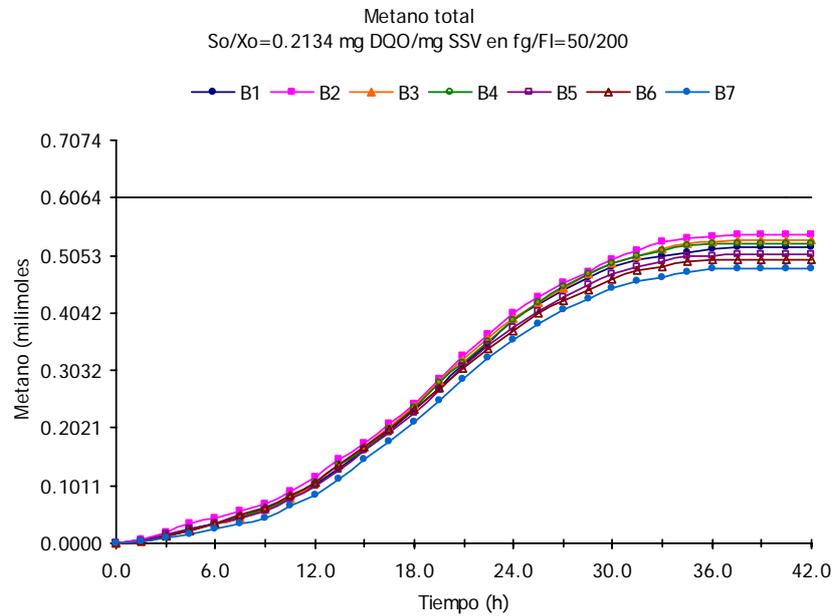


Figura AII.12 Metano total de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

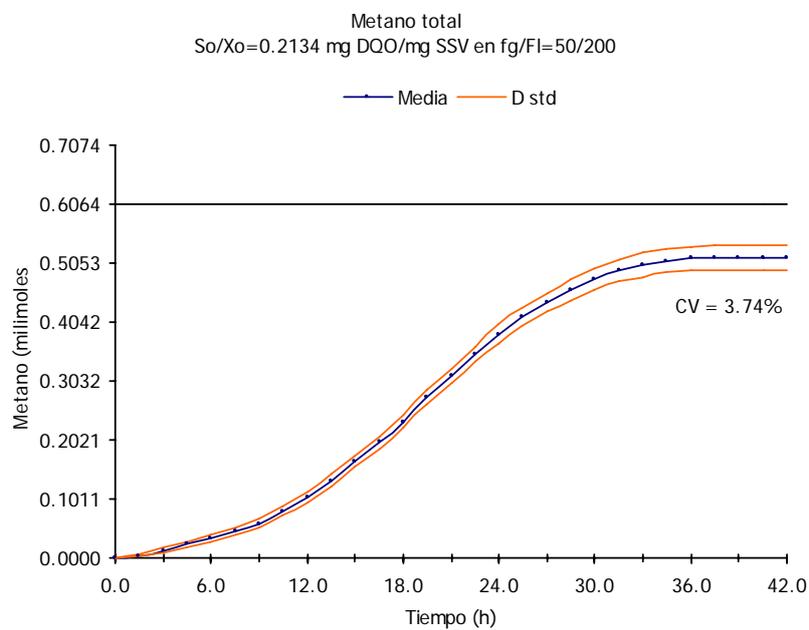


Figura AII.13 Metano total promedio de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

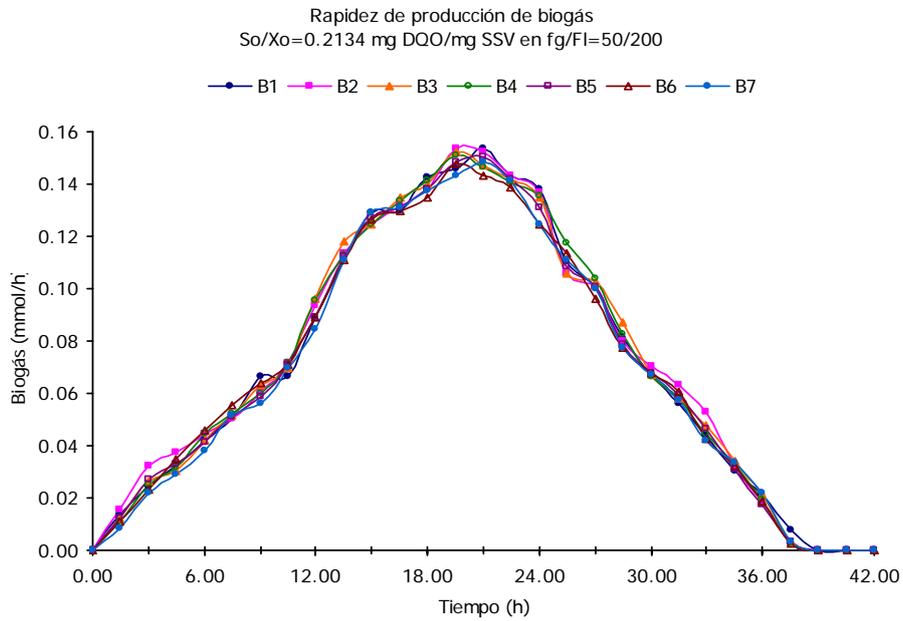


Figura AII.14 Rapidez de producción de biogás de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

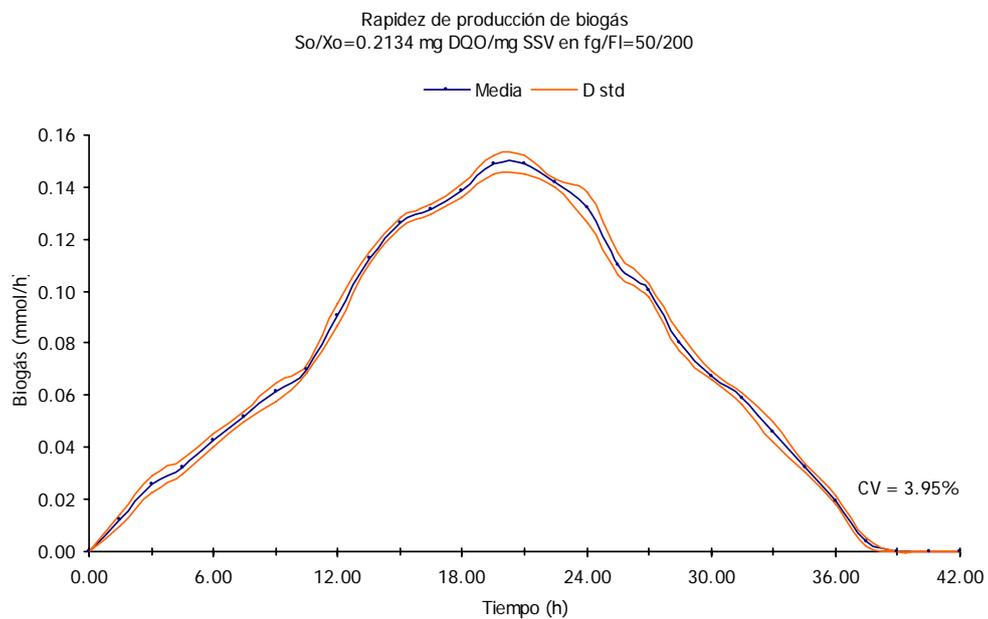


Figura AII.15 Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

AII.2 Pantallas del sistema anaerobio relación $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/mg SSV en $F_{gas}/F_{liq}=100/150$

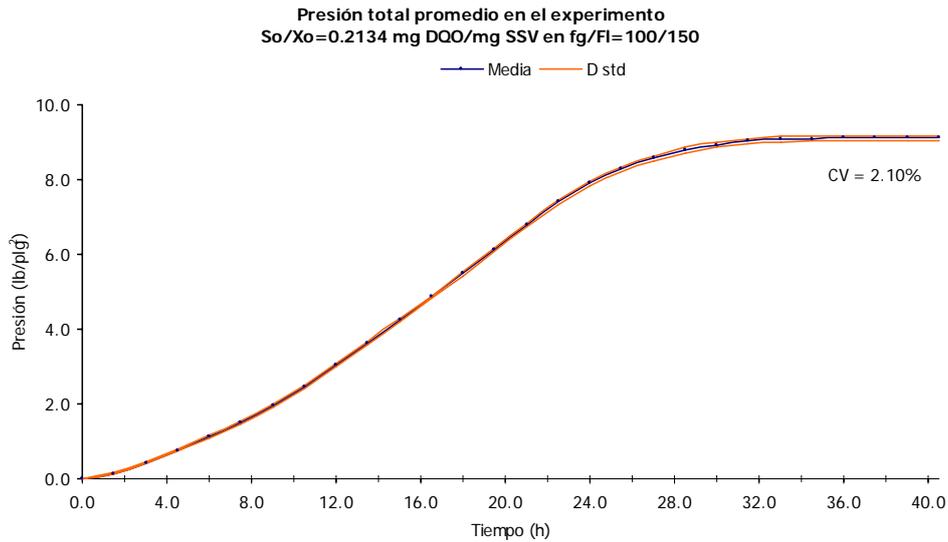


Figura AII.16 Presión total promedio del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

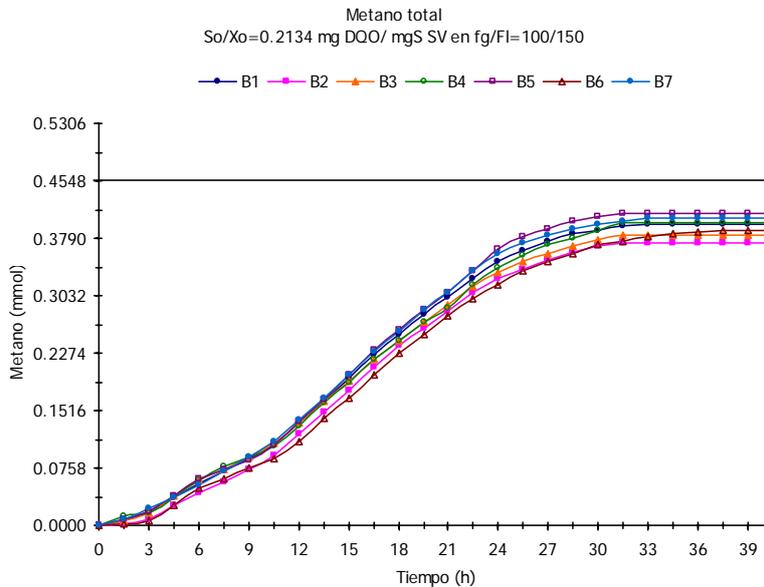


Figura AII.17 Metano total de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

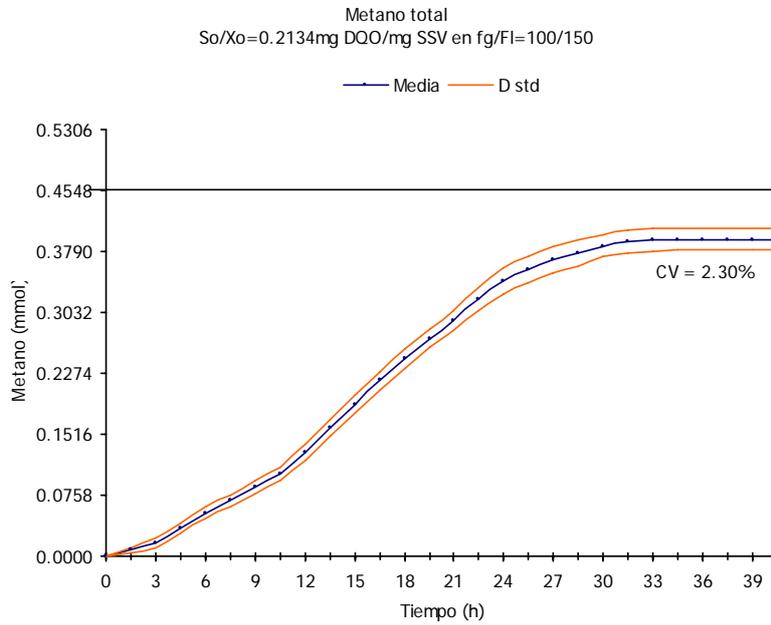


Figura AII.18 Metano total promedio de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

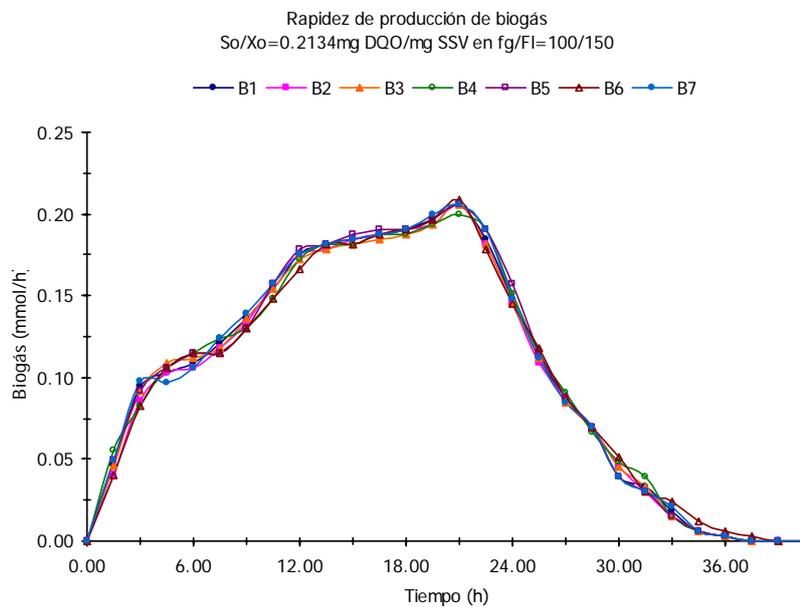


Figura AII.19 Rapidez de producción de biogás de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

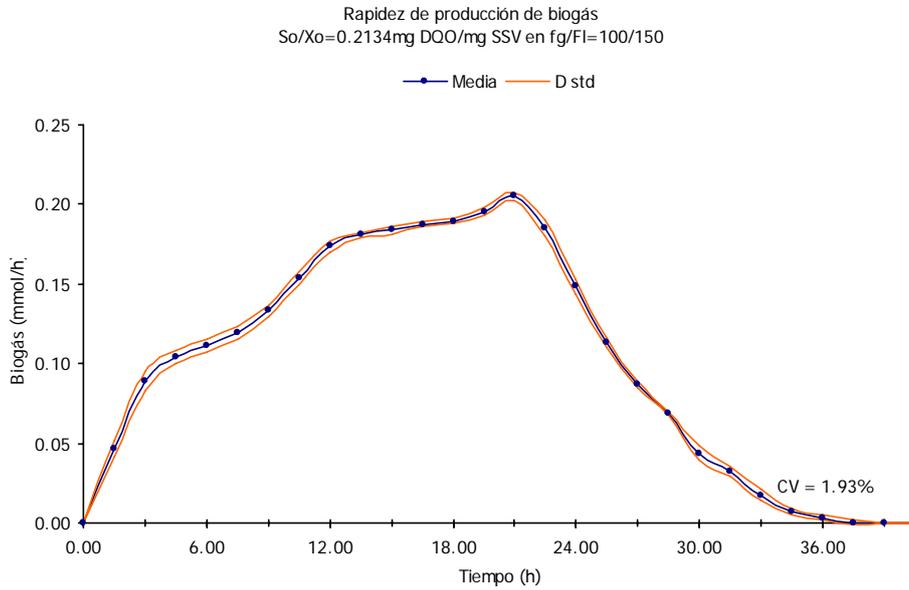


Figura AII.20 Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

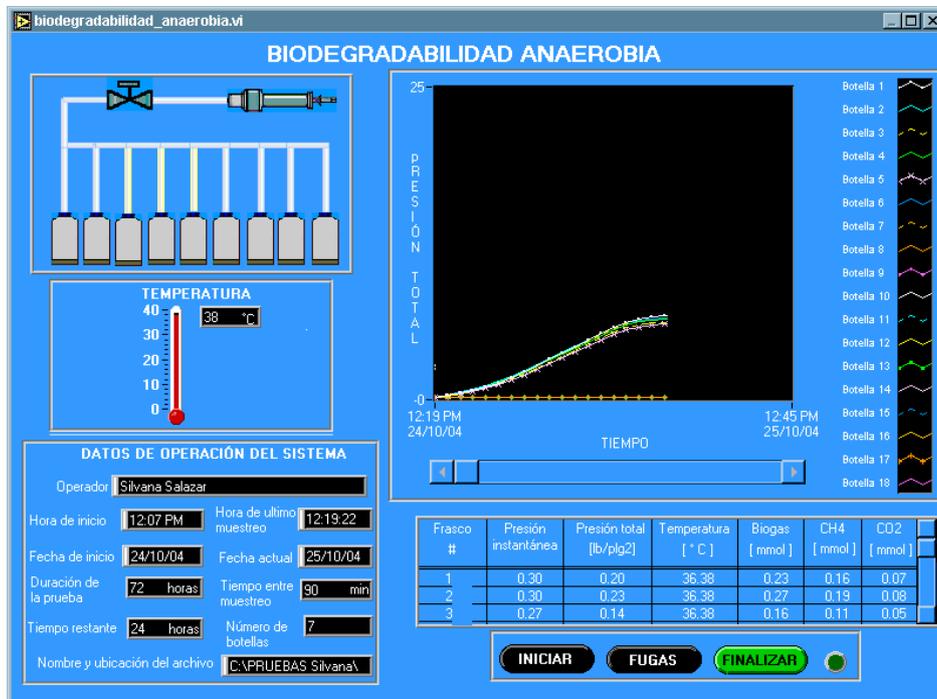


Figura AII.21 Pantalla de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

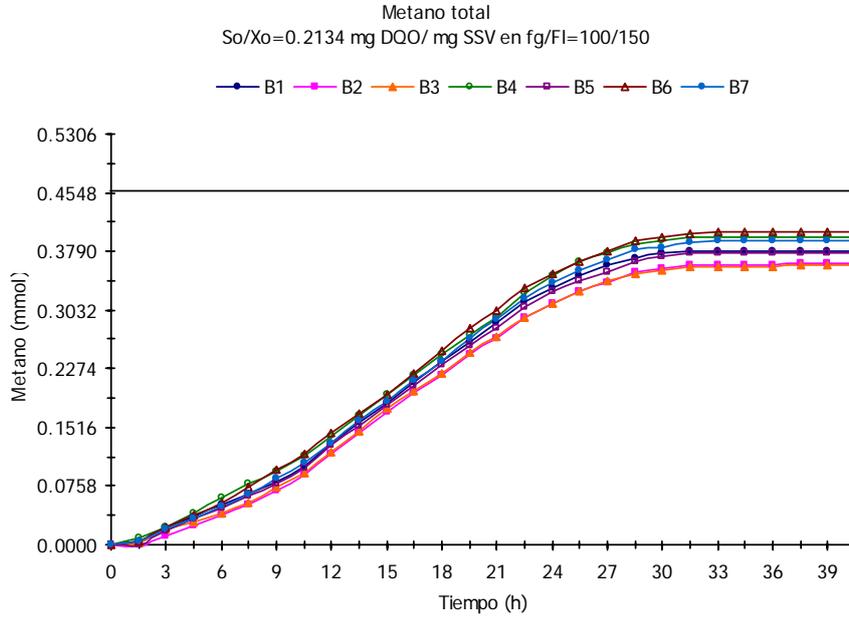


Figura AII.22 Metano total de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

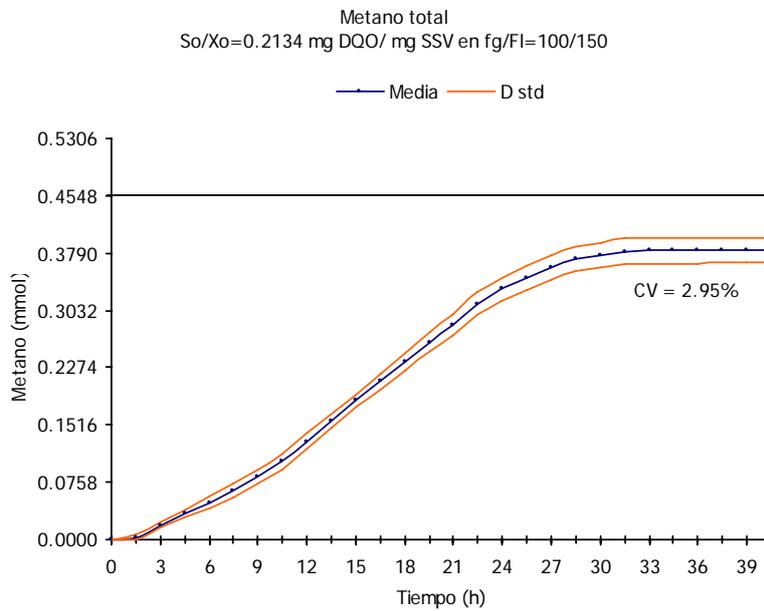


Figura AII.23 Metano total promedio de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

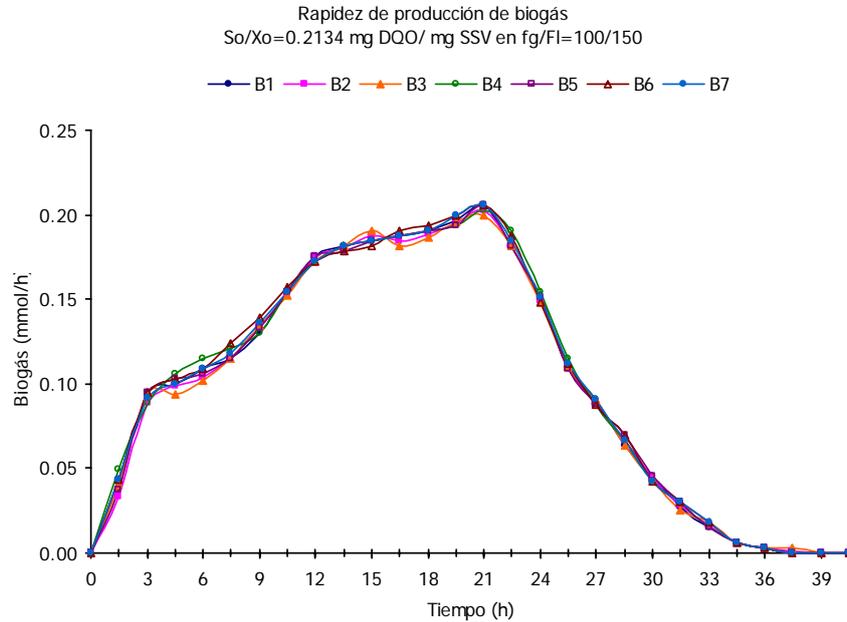


Figura AII.24 Rapidez de producción de metano de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

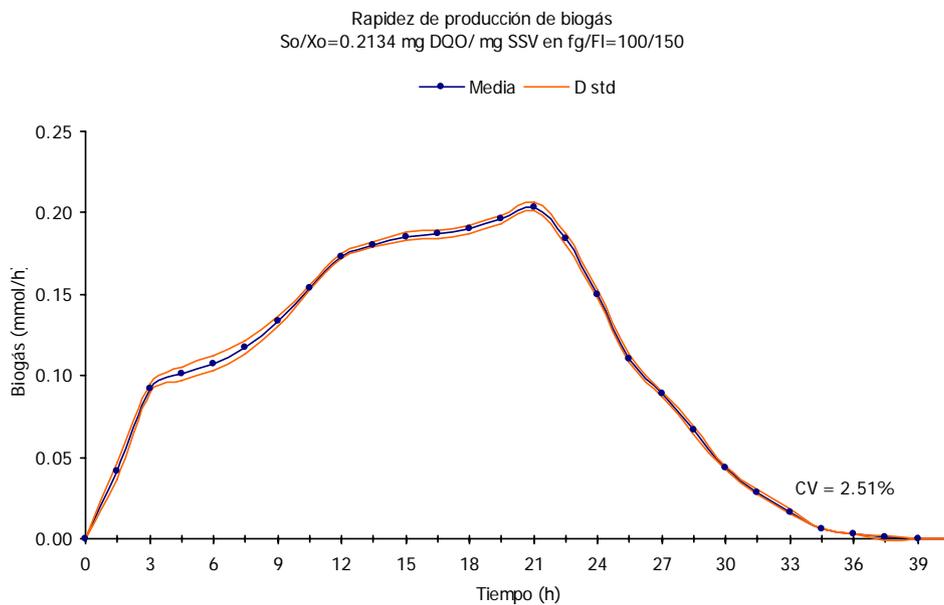


Figura AII.25 Rapidez de producción de metano de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

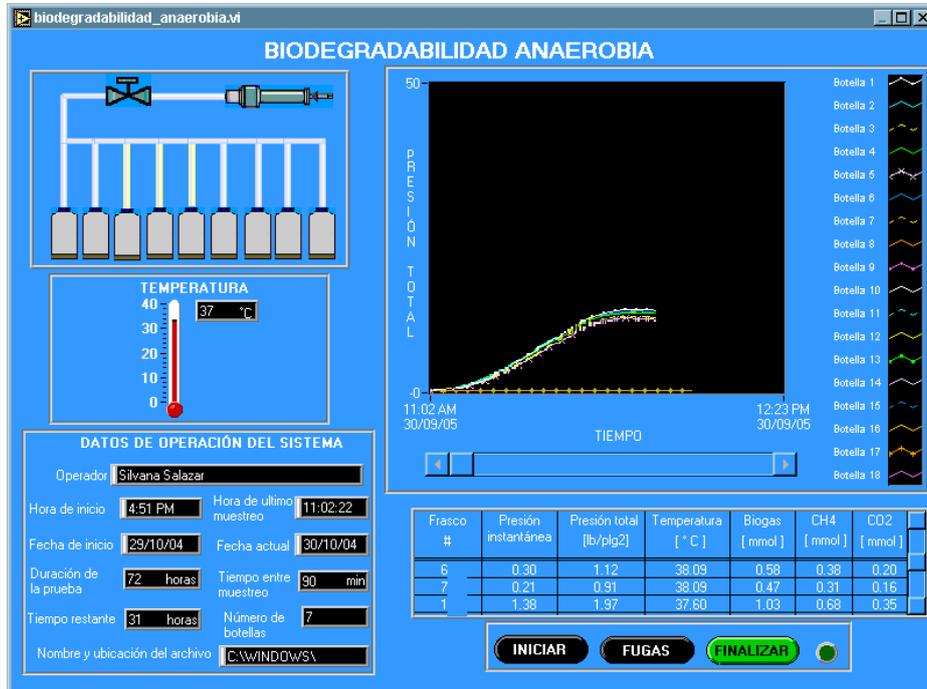


Figura AII.26 Pantalla de metano de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

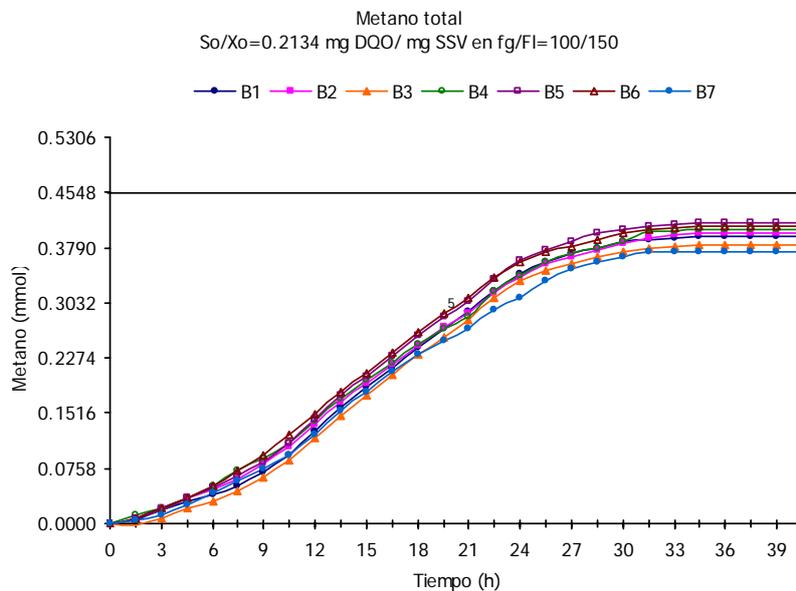


Figura AII.27 Metano total de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

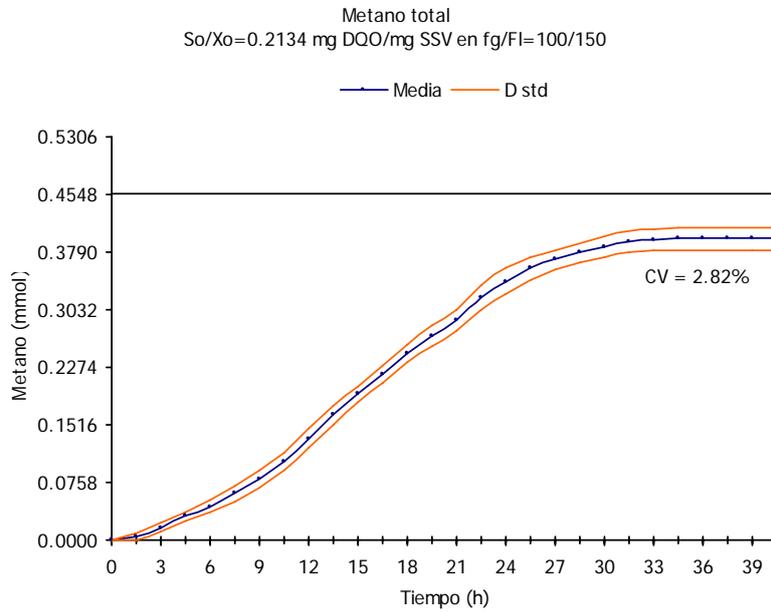


Figura AII.28 Metano total promedio de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

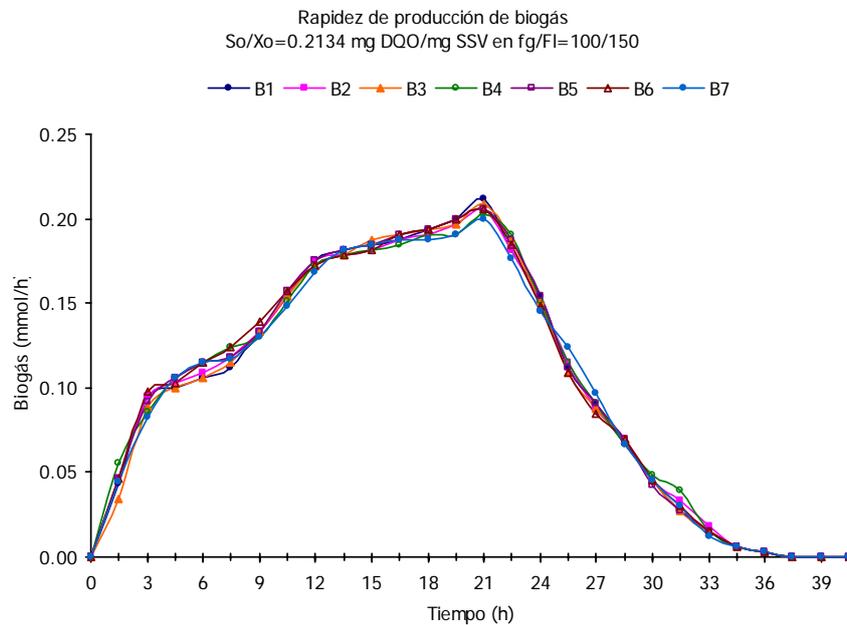


Figura AII.29 Rapidez de producción de biogás de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

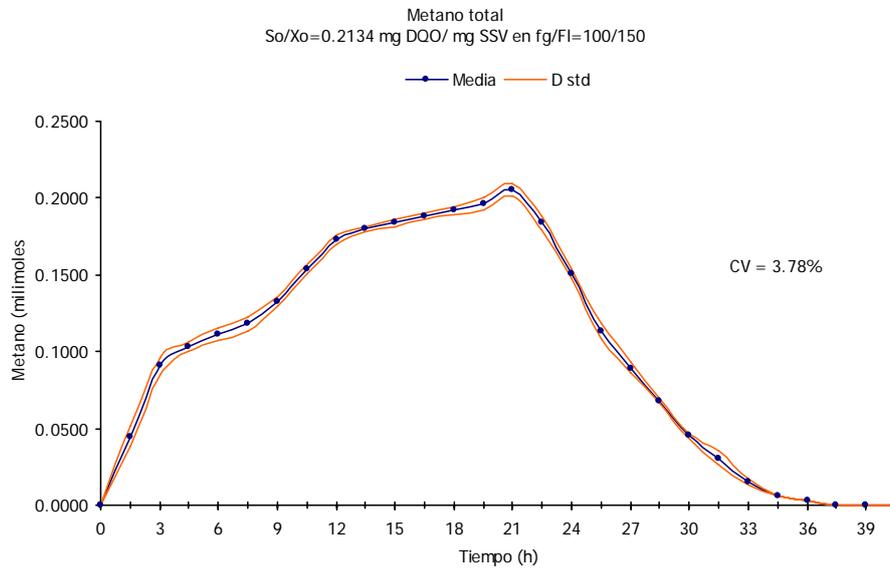


Figura AII.30 Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=213.4$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=100/150$.

AII.3 Pantallas del sistema anaerobio relación $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/mg SSV en $F_{gas}/F_{liq}=150/100$

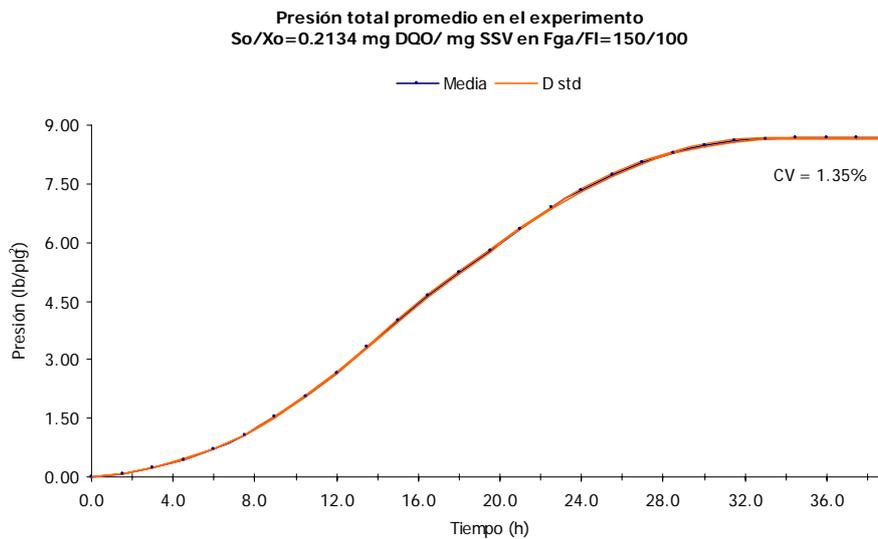


Figura AII.31 Presión total promedio del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=150/100$.

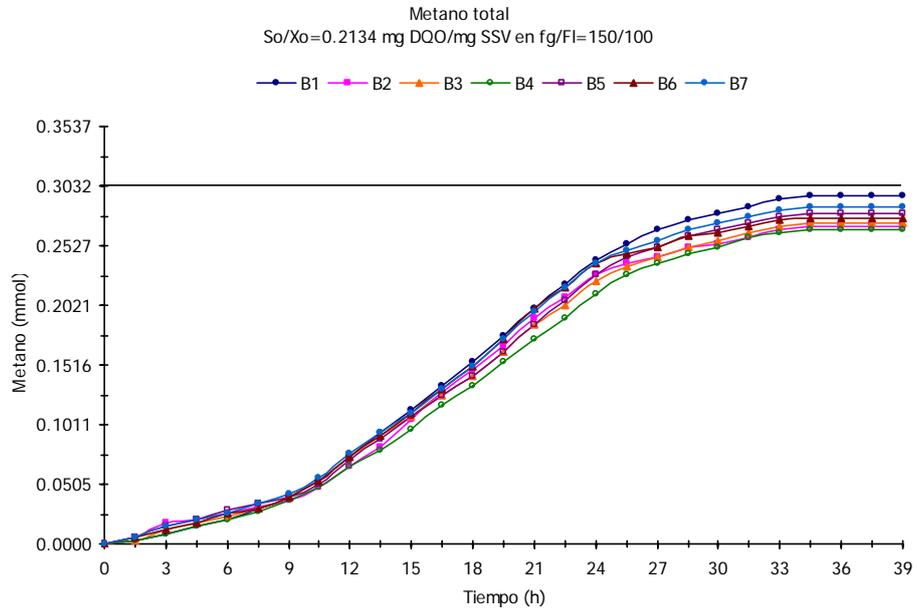


Figura AII.32 Metano total de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=150/100$.

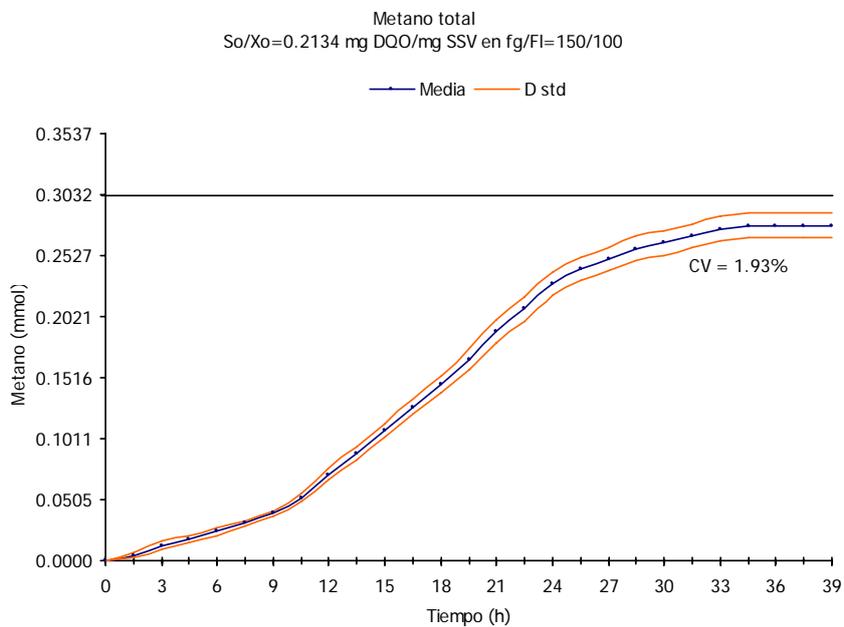


Figura AII.33 Metano total promedio de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=150/100$.

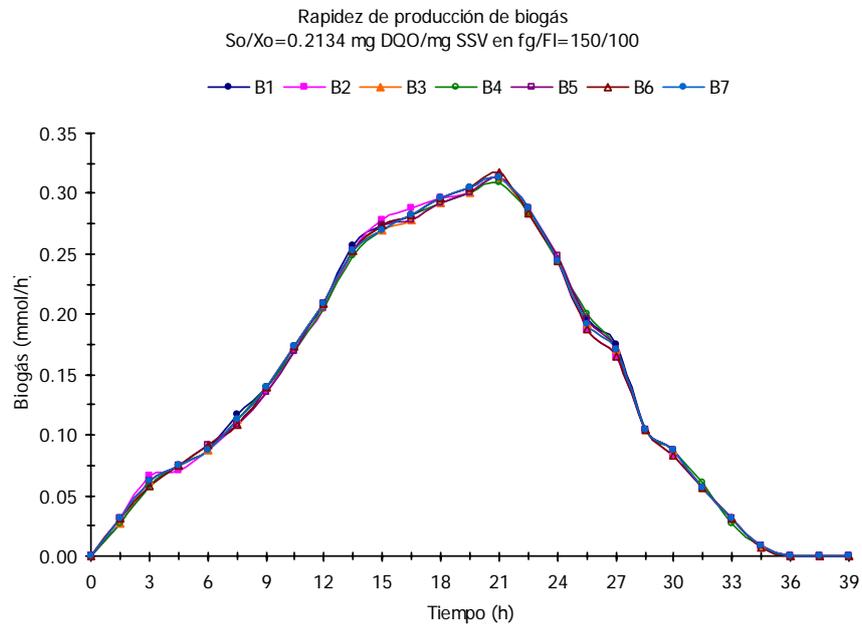


Figura AII.34 Rapidez de producción de biogás de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=150/100$.

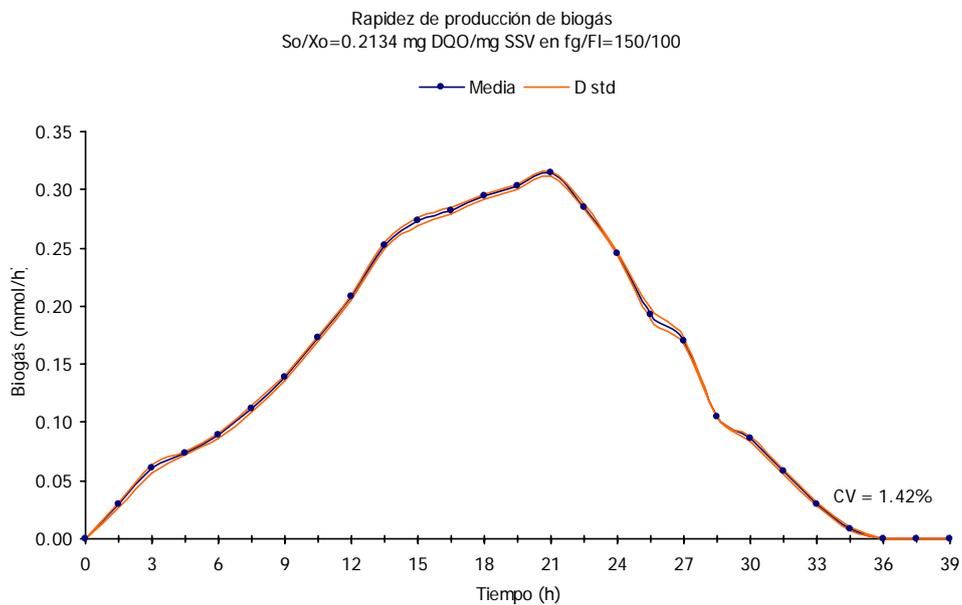


Figura AII.35 Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=150/100$.

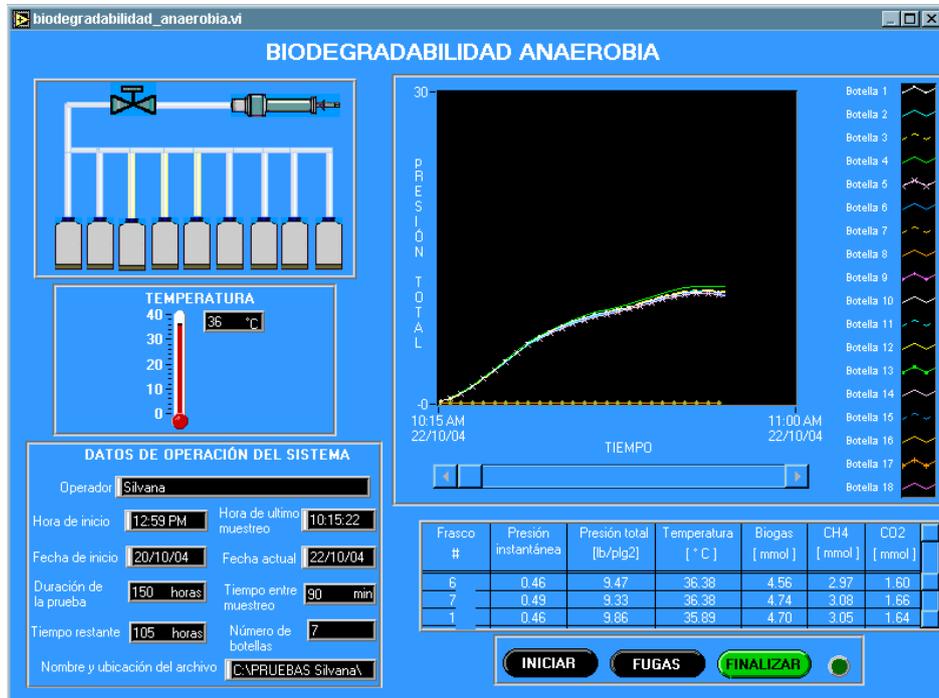


Figura AII.36 Pantalla de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=150/100$.

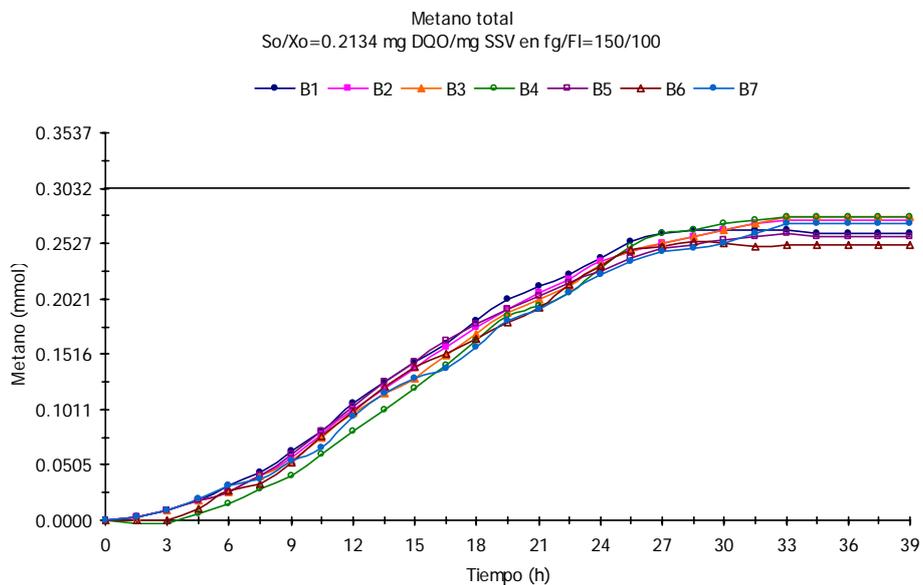


Figura AII.37 Metano total de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=150/100$.

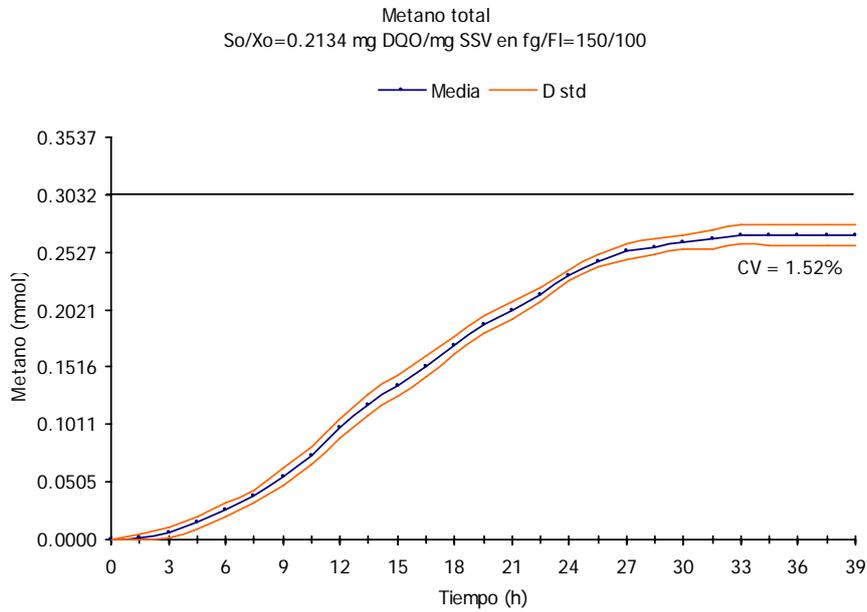


Figura AII.38 Metano total promedio de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=150/100$.

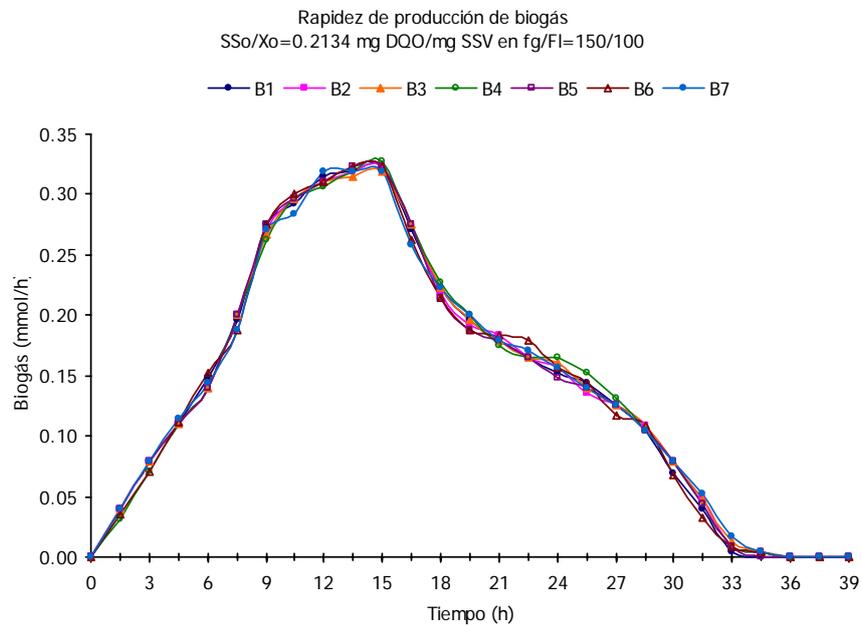


Figura AII.39 Rapidez de la producción de biogás de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=150/100$.

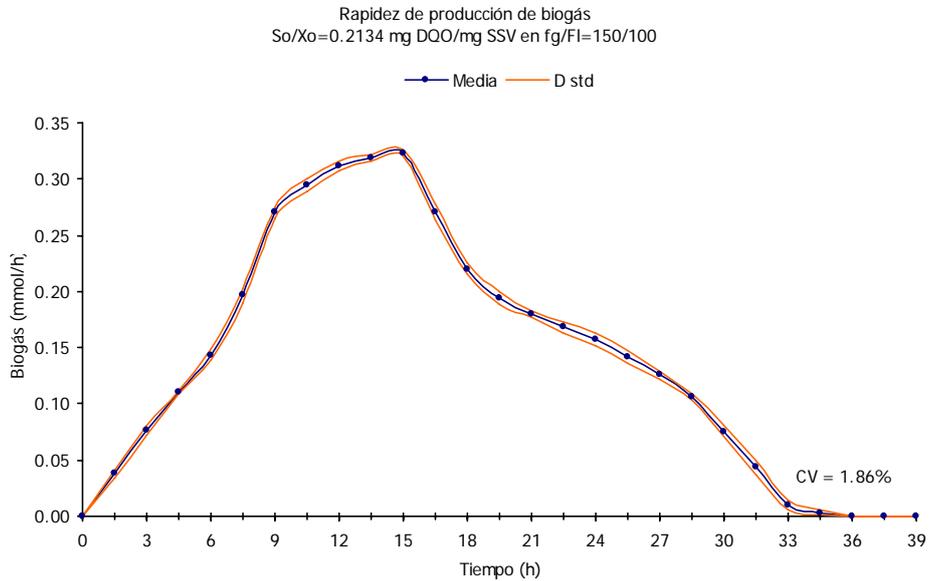


Figura AII.40 Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=150/100$.

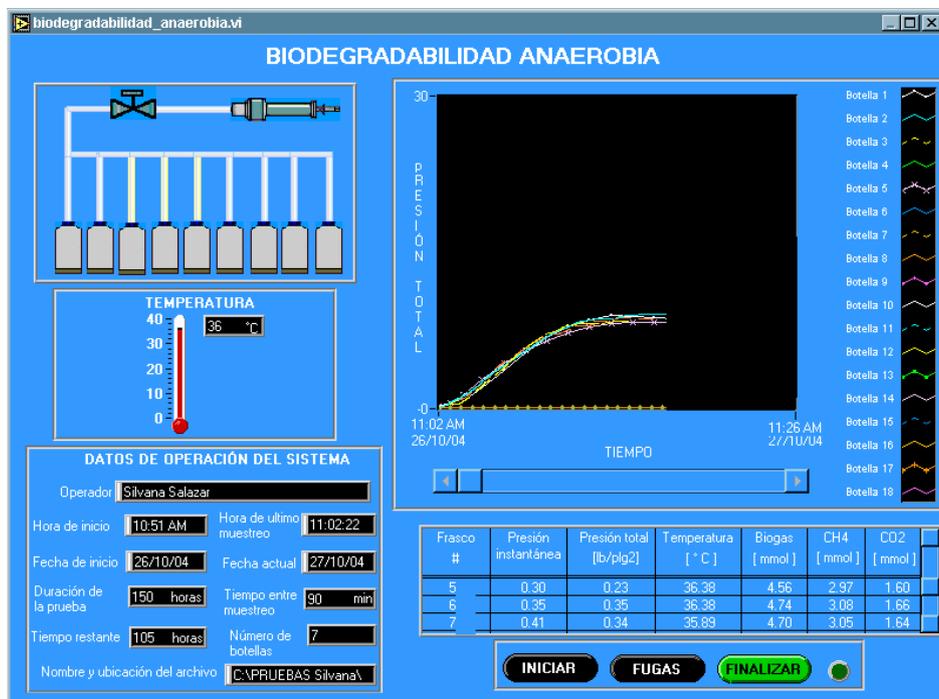


Figura AII.41 Pantalla de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=150/100$.

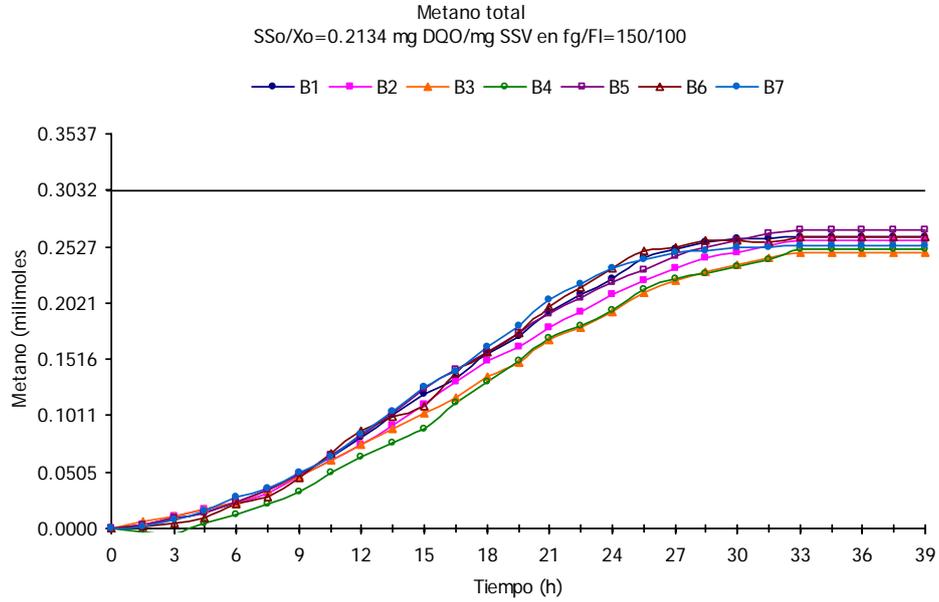


Figura AII.42 Metano total de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=150/100$.

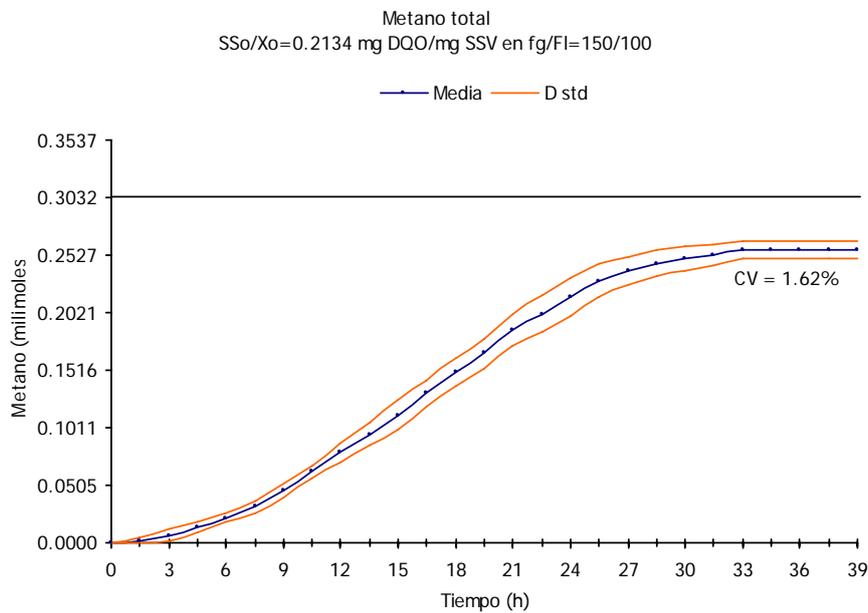


Figura AII.43 Metano total promedio de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=150/100$.

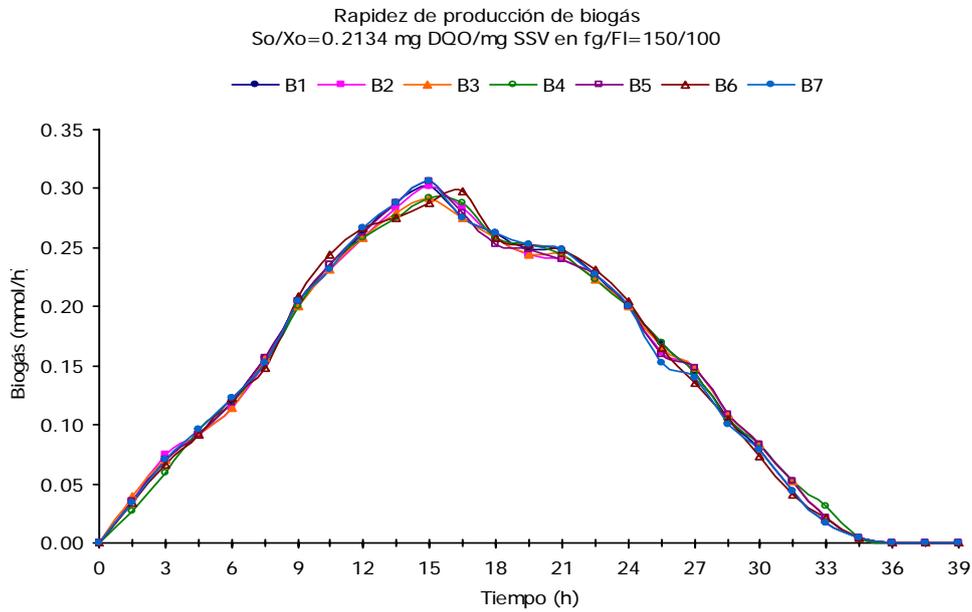


Figura AII.44 Rapidez de producción de biogás de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=150/100$.

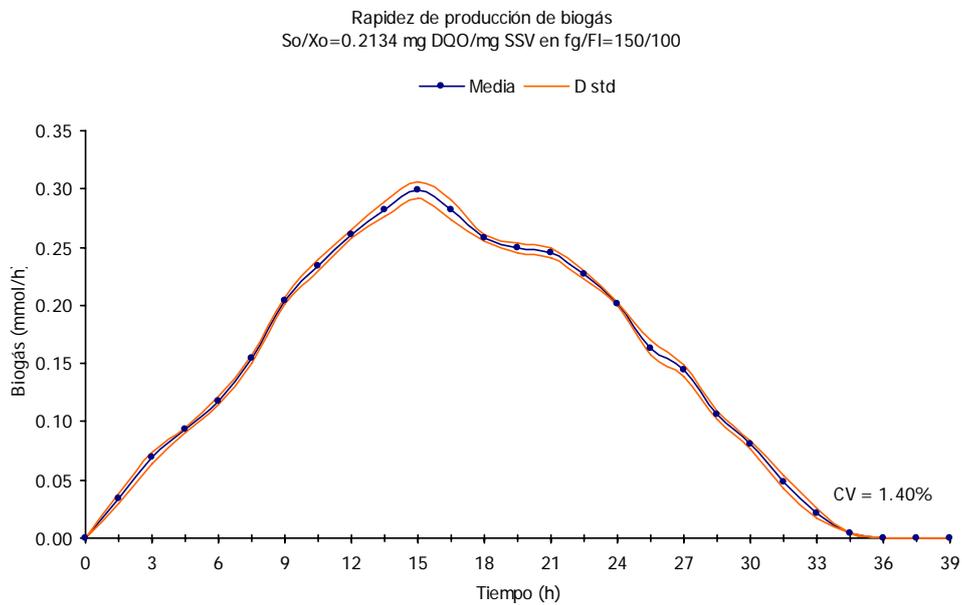


Figura AII.45 Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=0.2134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=150/100$.

AII.4 Pantallas del sistema anaerobio relación $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/mg SSV en $F_{gas}/F_{liq}=50/200$

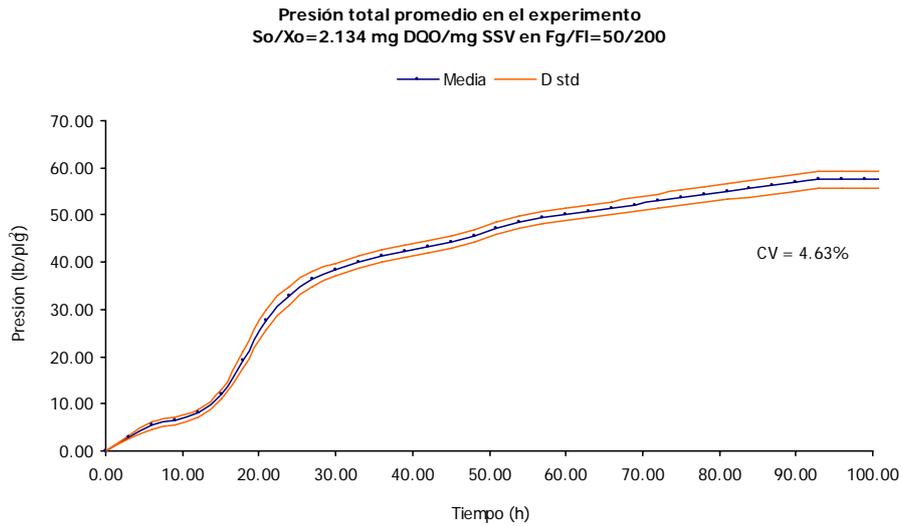


Figura AII.46 Presión total promedio del experimento $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

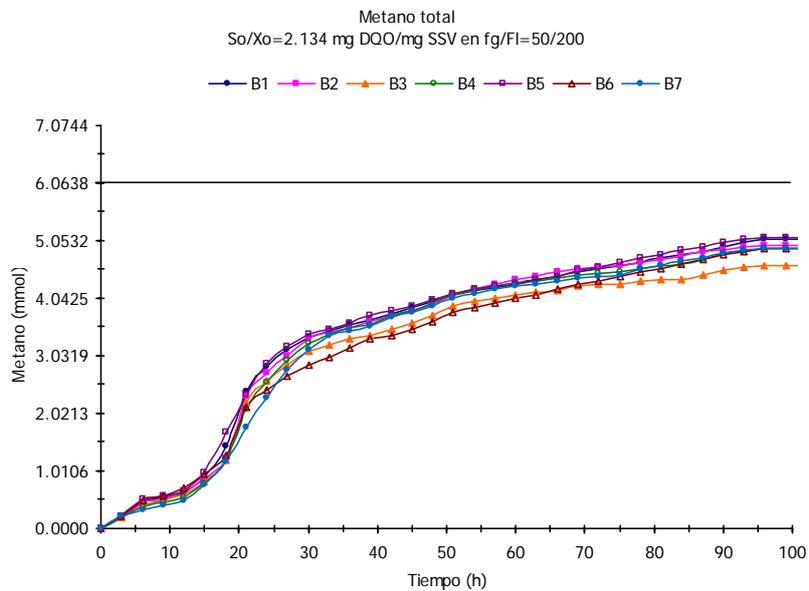


Figura AII.47 Metano total de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

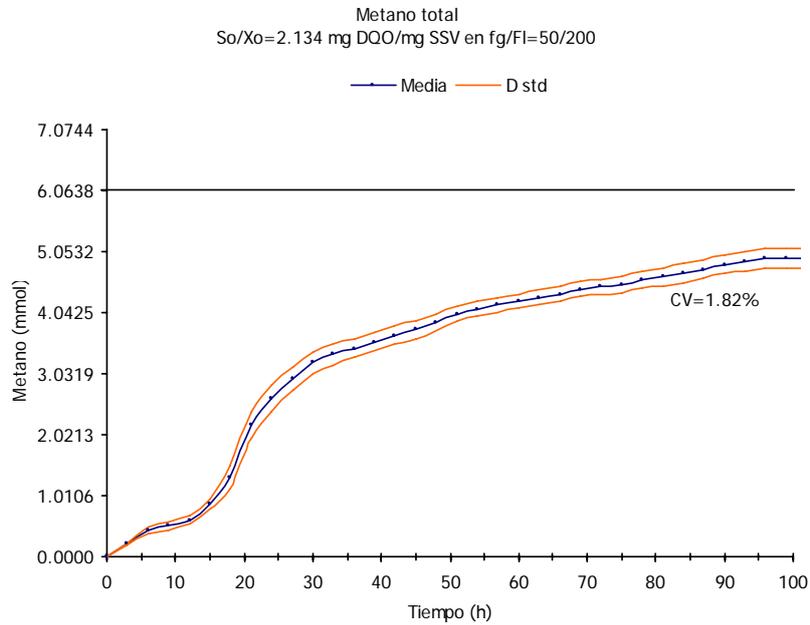


Figura AII.48 Metano total promedio de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

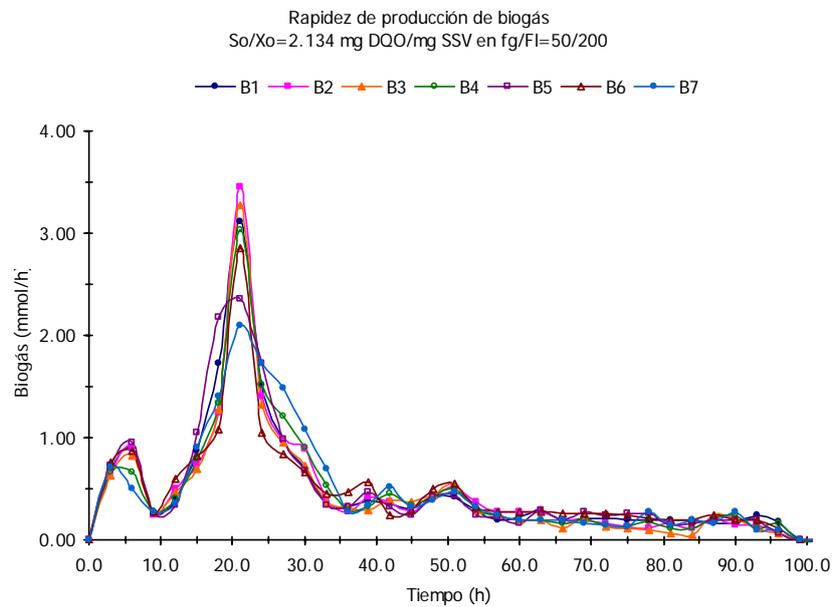


Figura AII.49 Rapidez de producción de biogás de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

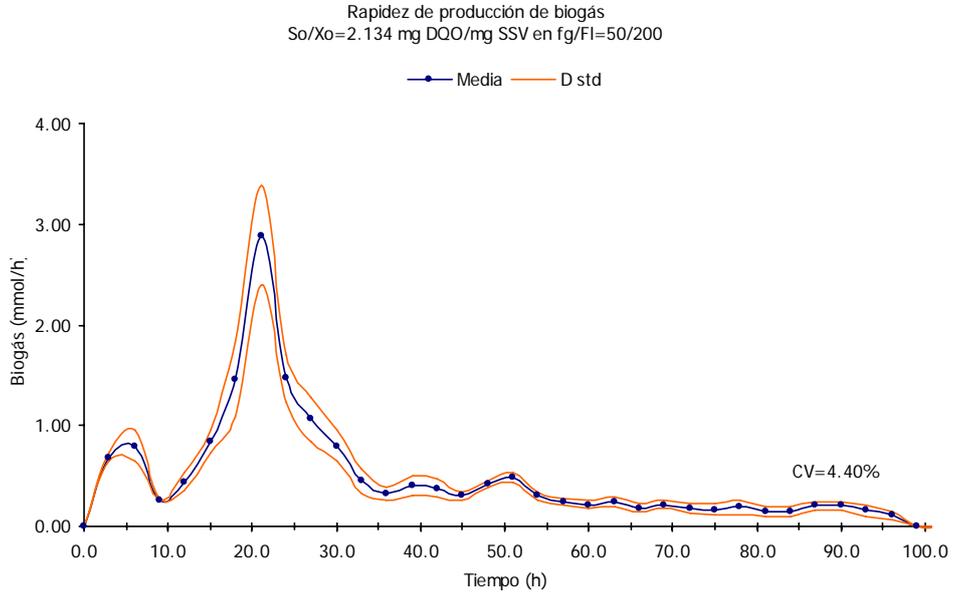


Figura AII.50 Rapidez de producción de biogás de la corrida 1 del experimento $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/mg SSV en una $F_{gas}/F_{lq}=50/200$.

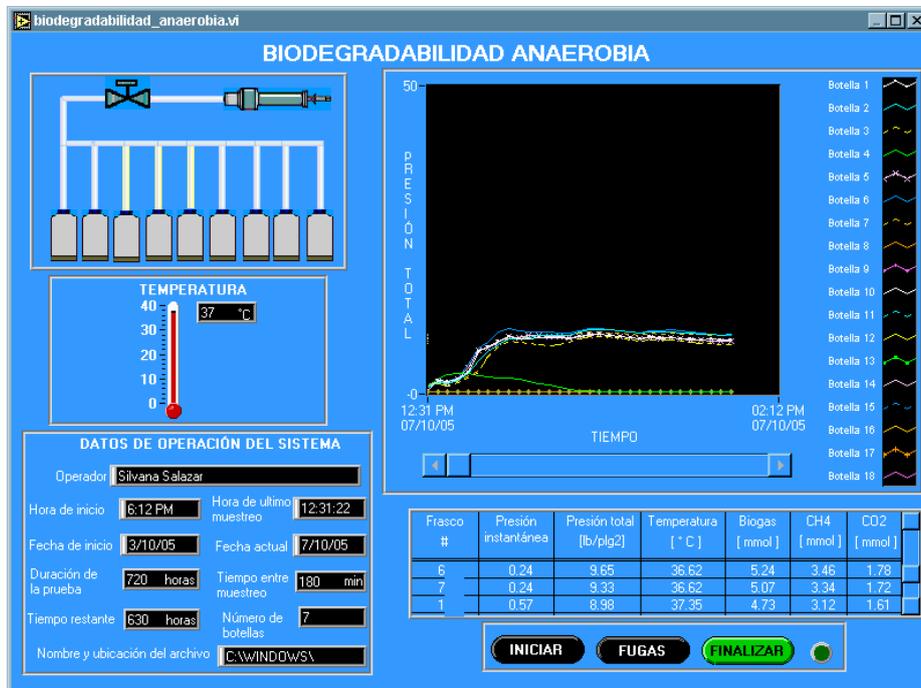


Figura AII.51 Pantalla de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/mg SSV en una $F_{gas}/F_{lq}=50/200$.

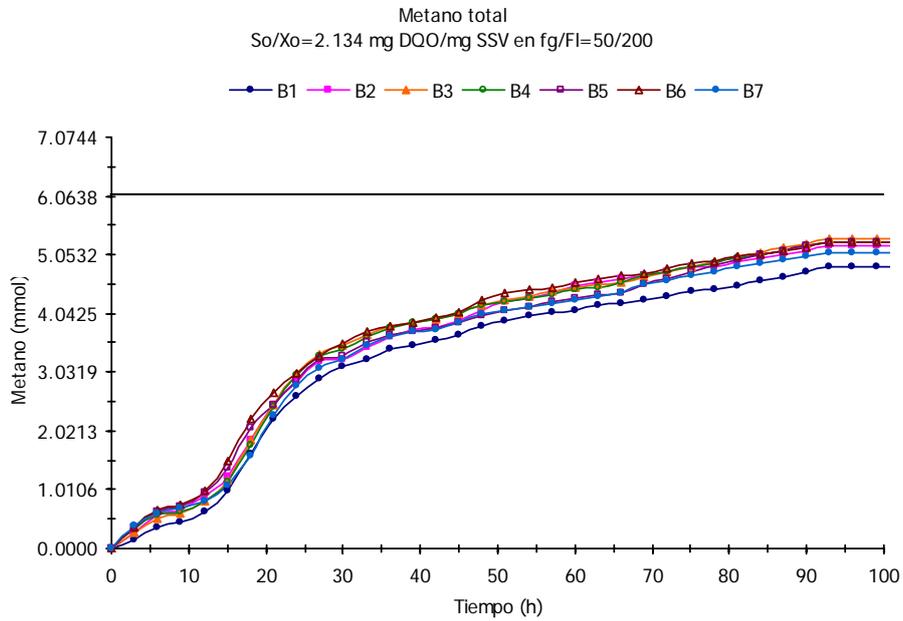


Figura AII.52 Metano total de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

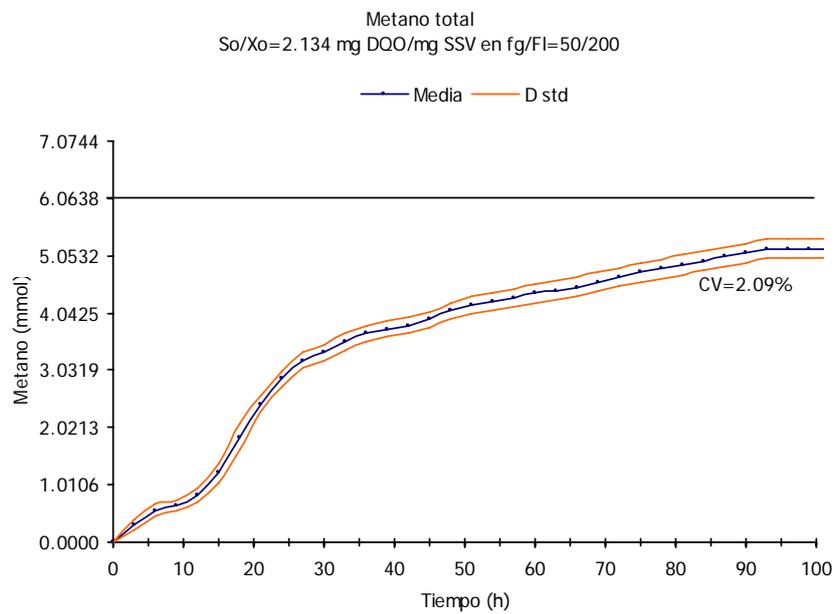


Figura AII.53 Metano total promedio de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

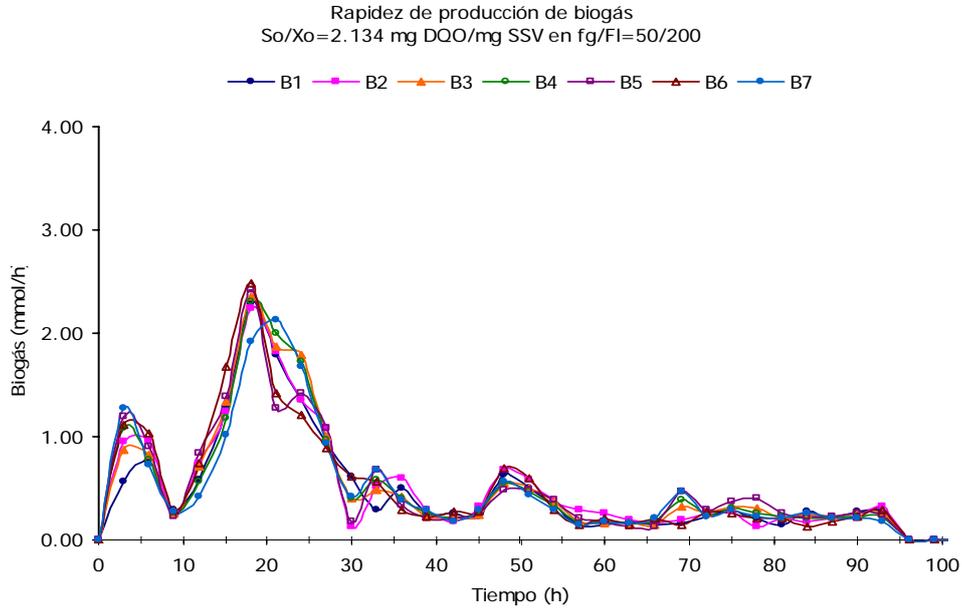


Figura AII.54 Rapidez de producción de biogás de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

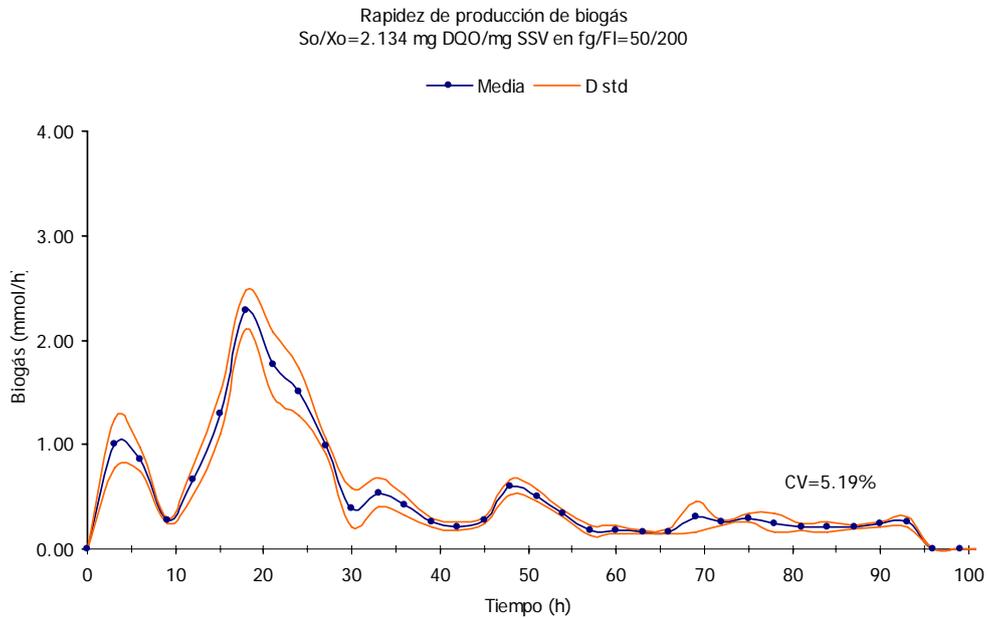


Figura AII.55 Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 2 del experimento $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

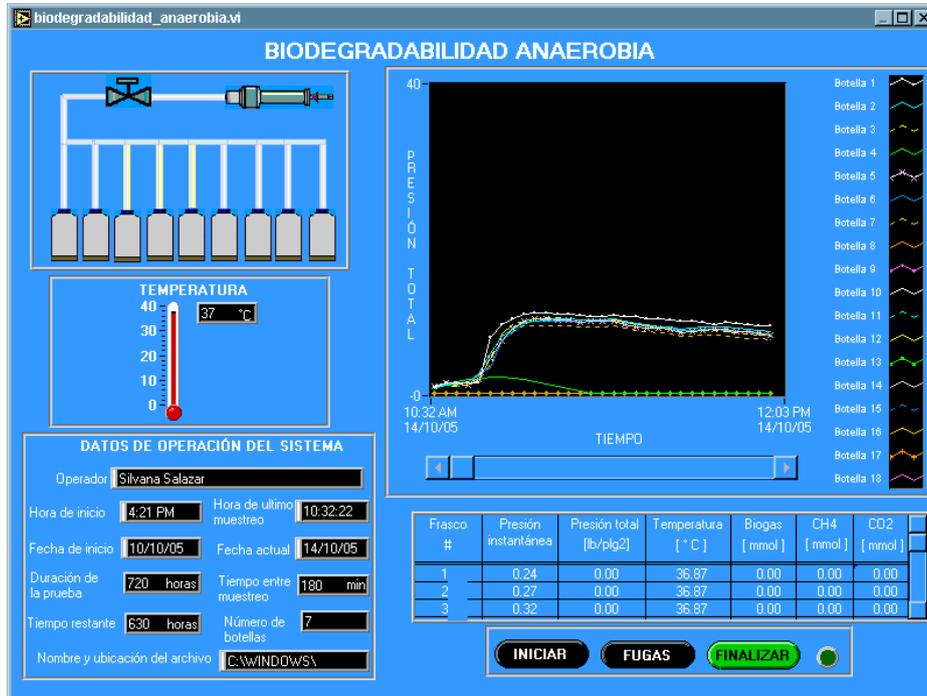


Figura AII.56 Pantalla de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

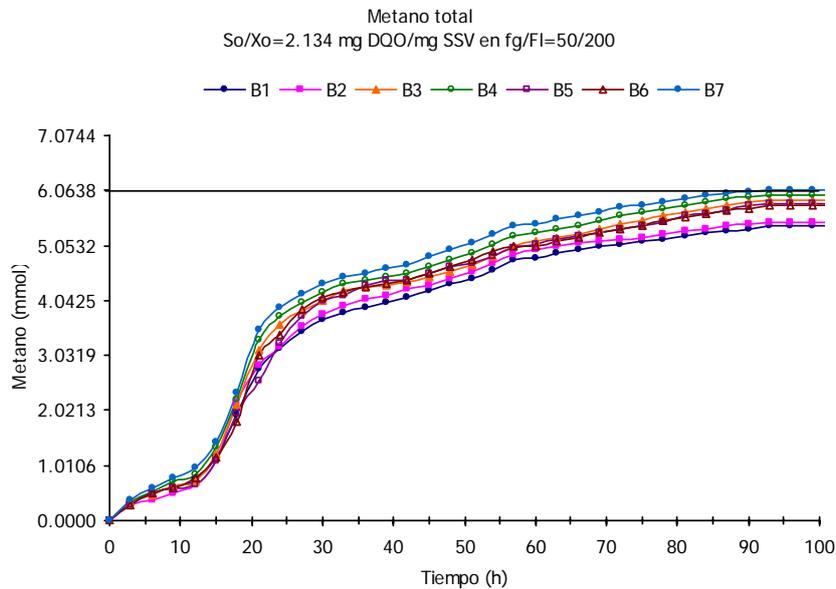


Figura AII.57 Metano total de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

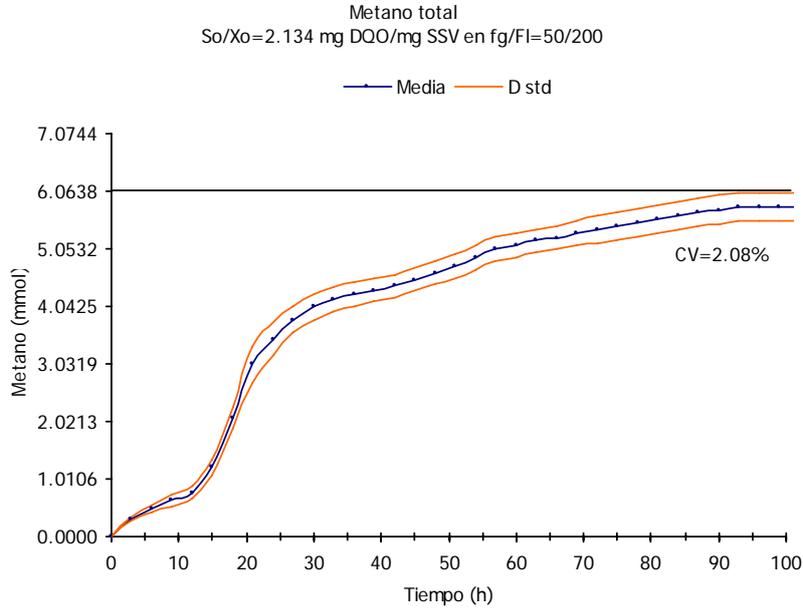


Figura AII.58 Metano total promedio de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

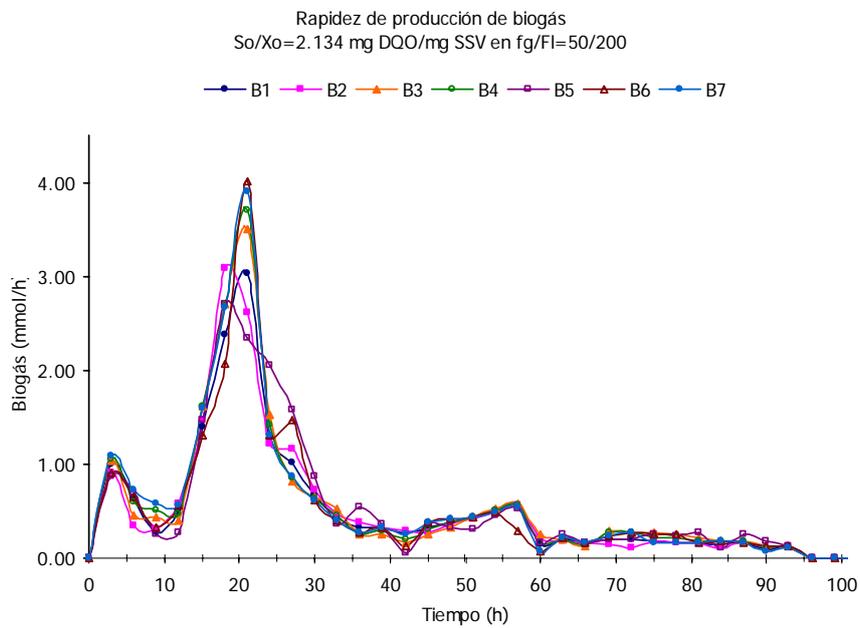


Figura AII.59 Rapidez de producción de biogás la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

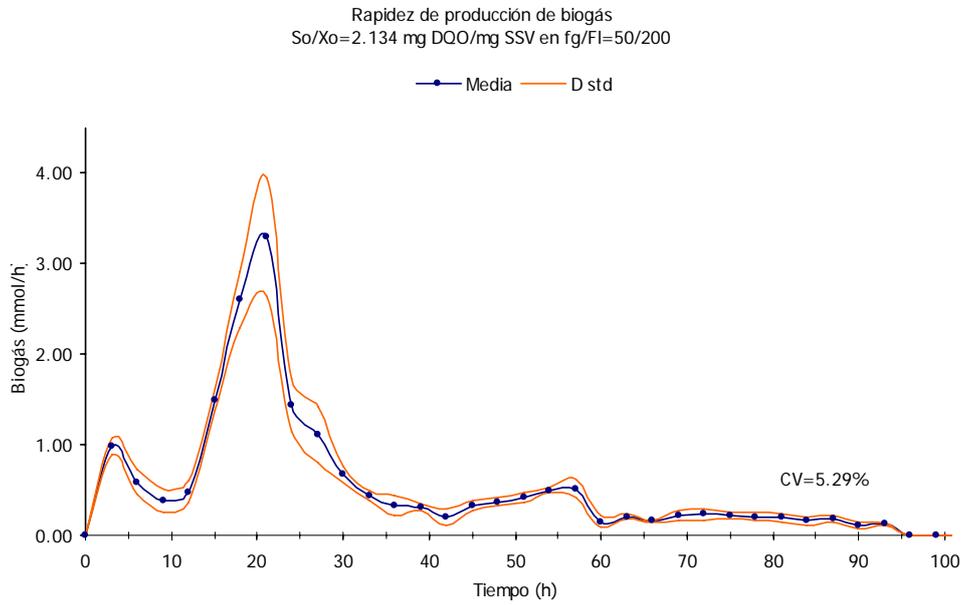


Figura A11.60 Rapidez de producción de biogás promedio de la corrida 3 del experimento $S_o/X_o=2.134$ mg DQO/ mg SSV en una $F_{gas}/F_{liq}=50/200$.

APÉNDICE III

COSTOS

AIII.1 Costos

Se han determinado los costos del equipo, considerando únicamente todos los accesorios y pequeños sistemas que lo conforman, obteniendo un costo neto de USD \$8,133.58. A este costo falta incluirle un concepto difícil de evaluar, tal como es el desarrollo de tecnología, el cual puede ser estimado considerando el salario de dos ingenieros, por el tiempo estimado de manufactura y pruebas del equipo.

Para fines más prácticos de este trabajo, sólo se considera el costo neto más el 15% por ciento del IVA, como se acostumbra, el valor del sistema (incluyendo la parte aerobia y anaerobia) genera un costo total de \$9,353.58 USD.

La tabla AIII.1, detalla los costos del equipo, estableciendo una diferencia entre las piezas de cada uno de los gabinetes (aerobio y anaerobio) y de las piezas que son de uso común o compartido. En la tabla, puede observarse que los componentes más costosos son la tarjeta de adquisición de datos y las válvulas multiplexoras, razón por la cual se hace la recomendación de utilizar otra configuración en las válvulas multiplexoras.

La figura AIII.1, muestra la cotización del equipo *AER-208 8-cell expandable aerobic/anaerobic respirometer system*[®], tiene un costo de \$22,585.00 USD, casi el doble del costo del sistema desarrollado en el Instituto de ingeniería, aquí presentado. Esta comparación, sólo sirve de parámetro, pero no es completamente equitativo, debido a que el equipo presentado es un prototipo que ha cumplido con los objetivos planteados en esta tesis. Es necesario que sea sometido a procesos de validación normalizados por el que han pasado los equipos comerciales, como el sistema cotizado.

Tabla AIII.1 Detalle de costos del sistema automatizado para la determinación de la biodegradabilidad aerobia y anaerobia

Concepto	Aerobio	Anaerobio	Compartido	C.U. (\$USA)	Cantidad	Costo
Gabinete	*	*		47.00	2.0	94.00
Platina de soporte	*	*		5.89	2.0	11.78
Válvula multiplexora de 6e y 1s	*	*		588.50	2.0	1177.00
Válvula multiplexora de 4e y 1s	*	*		587.40	2.0	1174.80
Válvula multiplexora de 2e y 1s	*	*		181.50	2.0	363.00
Conectores Olivas-Válvulas multiplexoras	*	*		8.00	30.0	240.00
Válvula solenoide	*	*		63.90	2.0	127.80
Conectores para válvula solenoide	*	*		3.70	4.0	14.80
Manguera	*	*		1.50	20.0	30.00
Conectores para manguera	*	*		9.63	20.0	192.60
Conectores deconexión rápida	*	*		12.29	20.0	245.80
Varios electrónica	*	*		12.50	2.0	25.00
Cables electrónica	*	*		2.65	2.0	5.30
Sensor de Presión Vacío	*			357.00	1.0	357.00
Frasco con depósito y oliva	*			88.20	10.0	882.00
Sensor de Presión		*		337.70	1.0	337.70
Frascos graduados		*		74.20	10.0	742.00
Interfase de Adquisición de Señales (IAS)	*	*		100.00	2.0	200.00
Computadora Personal			*	528.00	1.0	528.00
Cable conexión			*	140.00	1.0	140.00
Tarjeta de Adquisición de Datos (TAD)			*	1245.00	1.0	1245.00
Subtotal						8133.58 \$ USA
						15% IVA= 1,220.04 \$ USA
						Total = 9,353.62 \$ USA

Challenge Environmental Systems, Inc.

P.O. Box 3671, Fayetteville, AR, 72702
www.challenge-sys.com

Tel: (479) 927-1008 Fax: (479) 927-2672
e-mail: bill@challenge-sys.com

EMAIL MESSAGE

November 17, 2004

To: Mónica Silvana Salazar Plata
UNAM Instituto de Ingeniería
Tel: 55-56223324 ext 30
Fax: 55-56162798

From: Bill Moore, Director of Marketing,
Challenge Environmental Systems, Inc.

Attached is our quotation for an 8-cell AER-208 expandable respirometer system with temperature control options. All items are new and come with a one-year warrantee. All equipment needed for operation is included in the quotation with the exception of a computer and a cylinder of laboratory grade oxygen. Any computer, which uses Windows 95®+ as the operating system, can be used for the respirometer system.

You must pick which temperature control option best fills your needs. If you have a temperature controlled lab that maintains the temperature at $\pm 1\text{C}^\circ$ you may eliminate both options. Otherwise, you need to select a temperature control option.

There is a fee of 3% for shipping and handling added to the total.

We usually offer installation and training for the instrument for US\$ 2,000.00 this includes air travel, hotel, time, and meals. We are going to do the installation and training for \$1,000.00 to give you an extra savings.

NOTE ALL AMOUNTS ARE IN US DOLLARS!

We would expect to deliver within 30 days or less after receiving the Purchase Order.

Let me know if you have questions about the AER-208 respirometer system or the quotation.

Thanks,

Total pages = 2

Figura AIII.1 Cotización Challenge AER-208 (1ra parte)

Challenge Environmental Systems, Inc.

P.O. Box 3671, Fayetteville, AR, 72702
www.challenge-sys.com

Tel: (479) 927-1008 Fax: (479) 927-2672
e-mail: bill@challenge-sys.com

QUOTATION

(No. 111704-AER-208-2)

To: **Mónica Silvana Salazar Plata**
UNAM Instituto de Ingeniería

November 17, 2004

ITEM No.	Number of Units:	Description	Amount
1	1	AER-208 8-cell expandable aerobic/anaerobic respirometer system including:	US\$ 22,585.00
		1, <u>Gas flow module</u> consisting of 8 flow measuring cells, cell base, connecting tubing, cell fluid	
		1, <u>Software package</u> : Challenge data acquisition and graphics software	
		1, <u>Interface module</u> for AER-200 system containing: Data acquisition and A/D conversion boards, power supply, and interconnecting cables	
		1, <u>Aerobic/Anaerobic test module</u> consisting of:	
		10 - 500 mL reaction vessels 4 - 10 mL syringes	
		10 - reaction vessel caps 4 - 20 mL syringes	
		10 - KOH holders and tubes 4 - 60 mL syringes	
		100- butyl rubber septa 10 - stir bars (35 mm) with SpinRings	
		1, <u>8-position, MS8-300 stirring base</u> with controller and tachometer	
		1, <u>Instruction manual</u> for AER-200 system	
2.		University discount	<2,259.00>
3.		Temperature control option 1: HCU-230 Heating/cooling system and water bath	3,700.00
4.		Temperature control option 2: HCH-200 Heating only system and water bath	1,750.00
5.		Installation and training	1,000.00
6.		Shipping and handling	3% of above total

The above prices are good for purchase through May 31, 2005

Delivery: Within 30 days after receiving Purchase Order
Payment terms: Payment in advance is required unless ordered by irrevocable letter of credit. Wire transfer accepted. Purchaser pays all import fees, taxes and transportation beyond port of entry.

Bill Moore, Director of Marketing Date
Challenge Environmental Systems, Inc.

Figura AIII.2 Cotización Challenge AER-208 (2da parte)

