

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1 REACTOR ANAEROBIO

IV.1.1 pH

La Figura IV.1 y IV.2 muestran el comportamiento del pH dentro del reactor para la carga A y B respectivamente. Como lo muestra la Tabla IV.1, el comportamiento de la carga A es bastante errático comenzando en un valor de 8, atribuible al pH inicial del inóculo, con una tendencia a la baja culminante con un valor de 5 para el quinto día para posteriormente sufrir una tendencia a la estabilización en el valor 7. El comportamiento errático es atribuible al periodo de adaptación de las bacterias a un nuevo hábitat.

Por otro lado acorde con la Tabla IV.2 para la carga B pueden distinguirse cuatro etapas de pH:

- 1) Una etapa ácida (pH=6) durante el segundo y tercer día
- 2) Una etapa básica (pH=8) durante el cuarto y quinto día
- 3) Una etapa neutra (pH=7) del sexto al doceavo día
- 4) Una nueva etapa ácida

Éste comportamiento es el normal y previsto (Ly y col., 2004) para un sistema de degradación estable. En un principio la mezcla introducida es un poco ácida y la primera etapa de la degradación (ácidogénesis) forma compuestos ácidos, en los días posteriores, tras haber alcanzado un pH menor o igual al inicial. Las etapas de acetogénesis y metanogénesis comienzan transformando los compuestos ácidos en acetatos, en metano y dióxido de carbono ocasionando que la mezcla se torne básica por un breve periodo de tiempo, al concluir este breve periodo, la mezcla tiende a estabilizarse en un valor neutro hasta que la producción de ácidos supere nuevamente el empleo de los mismos.

Tabla IV.1: Resultados tabulares de pH en la carga A

Día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
pH	8	7	7	6	5	6	7	7	7	6	7	8	7	7	7	6	7	7	7	6	5
pH promedio	6.6																				

Tabla IV.2: Resultados tabulares de pH para la carga B

Día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
pH	7	6	6	8	8	7	7	7	7	7	7	7	6
pH promedio	6.8												

Figura IV.1: Representación del comportamiento del pH para la carga A

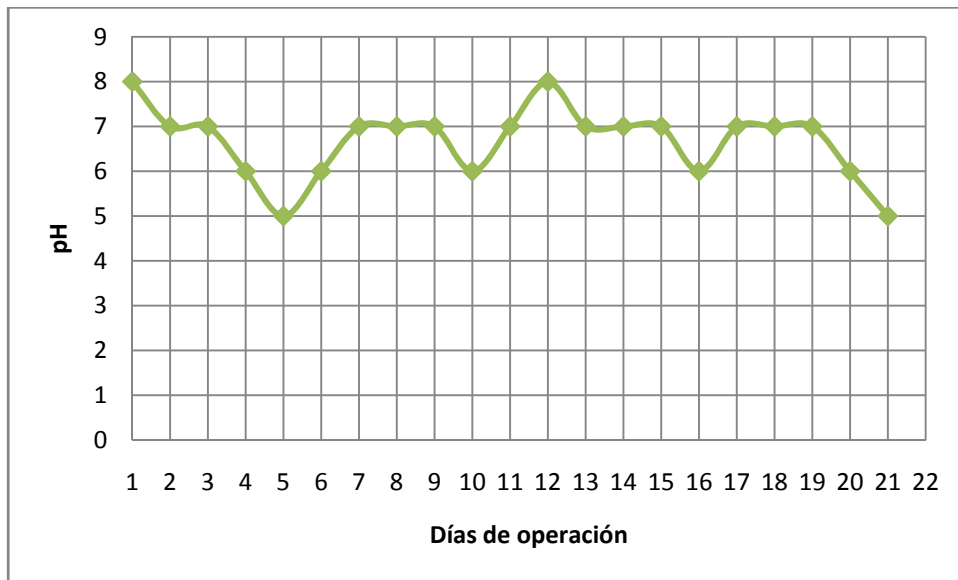
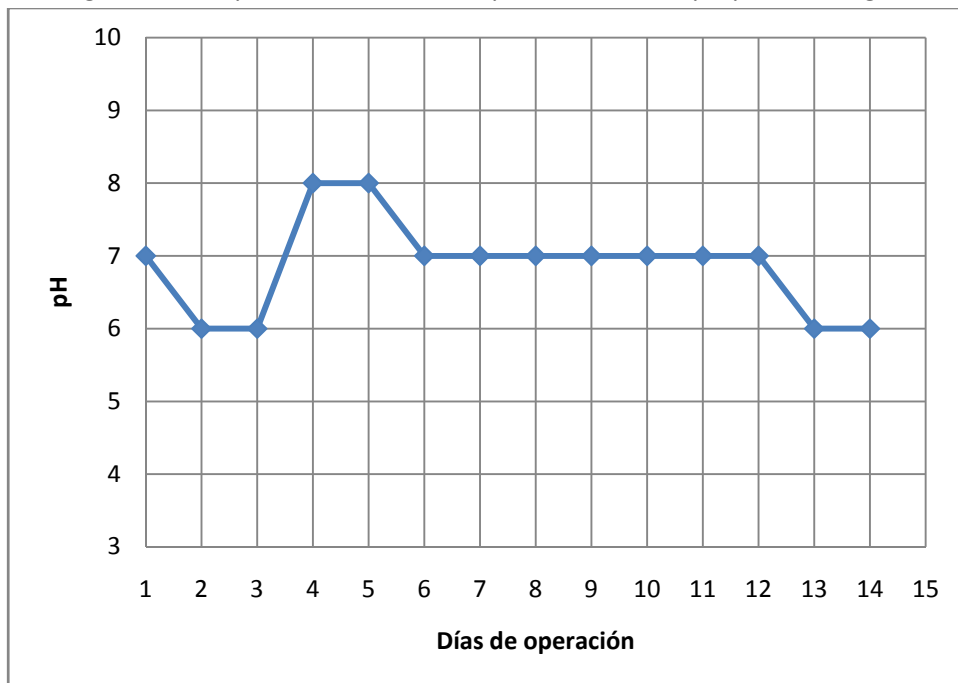
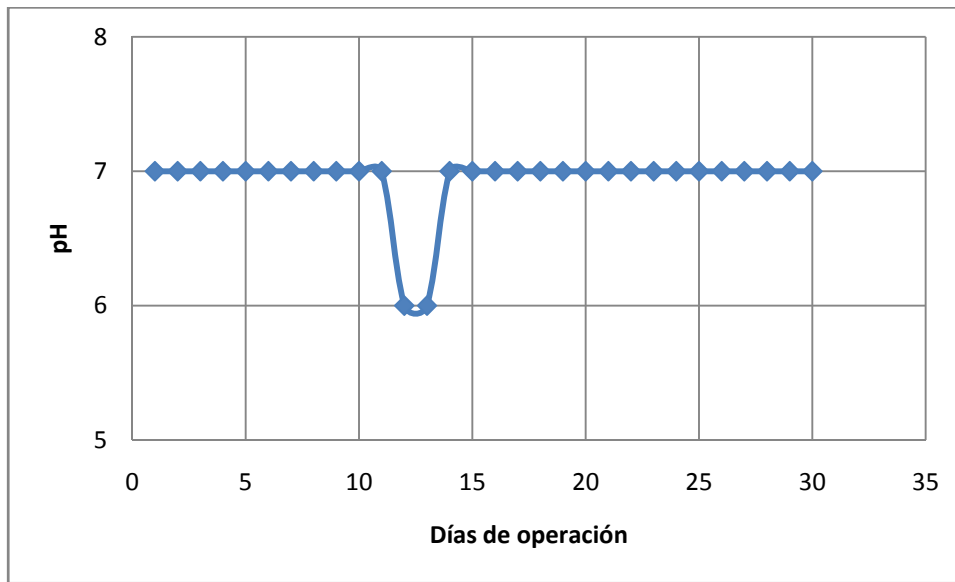


Figura IV.2: Representación del comportamiento del pH para la carga B



La Figura IV.3 muestra el comportamiento de pH para la carga C, el comportamiento resulta sumamente estable debido a la baja actividad de las colonias bacterianas.

Figura IV.3: Representación del comportamiento del pH para la carga C



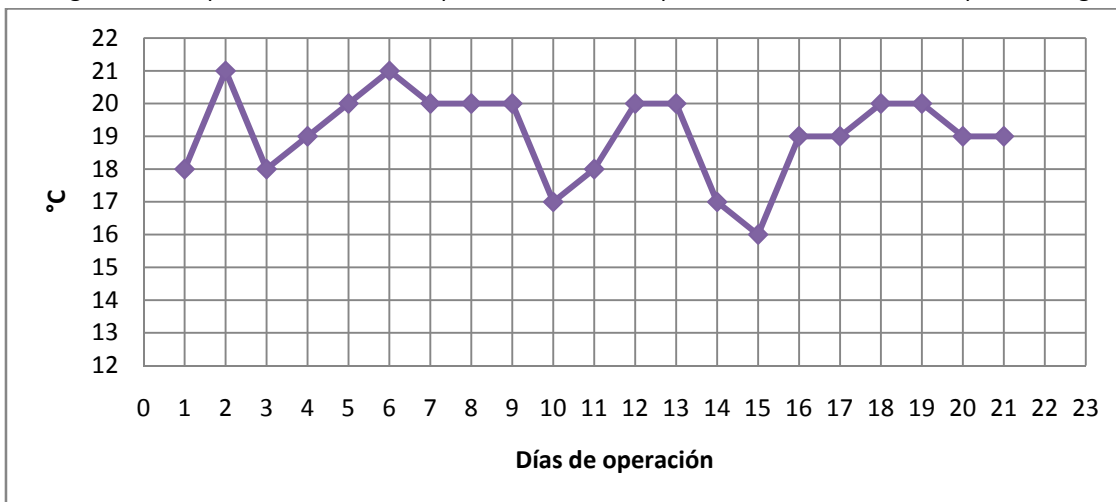
IV.1.2 TEMPERATURA:

La temperatura, Tabla IV.3 y Figura IV.4, promedio para la carga A fue de 19°C estableciendo al sistema como un sistema psicofílico, lo cual explica la baja producción de biogás obtenida.

Tabla IV.3: Resultados tabulares de temperatura para la carga A.

Días	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Temp. °C	18	21	18	19	20	21	20	20	20	17	18	20	20	17	16	19	19	20	20	19	19
Temperatura promedio								19.09 °C													

Figura IV.4: Representación del comportamiento de temperatura dentro del reactor para la carga A.



Las mediciones de temperatura externa e interna, Tabla IV.4 y Figura IV.5, para la carga B llevadas a cabo a la misma hora todos los días (11:30am) indican variaciones de $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Manteniendo una temperatura promedio de 21°C del rango de operación mesofílico. El comportamiento anterior también puede observarse para la carga C (Figura IV.6)

TablaIV.4: Resultados tabulares de temperatura para la carga B

Días de operación	Temperatura del reactor	Temperatura ambiente
1	21	21
2	21	21
3	21	22
4	25	26
5	25	26
6	19	17
7	22	23
8	22	23
9	22	23
10	22	21
11	21	20
12	22	21
13	22	21
14	22	21
Promedio	21.92	21.85

Figura IV.5: Representación de la temperatura ambiente y del reactor para la carga B

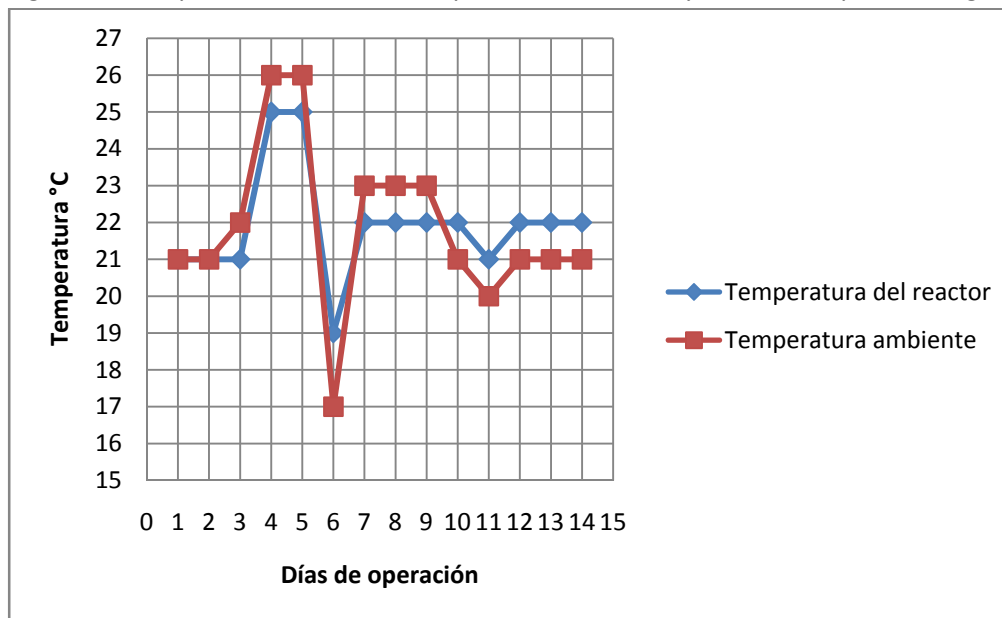
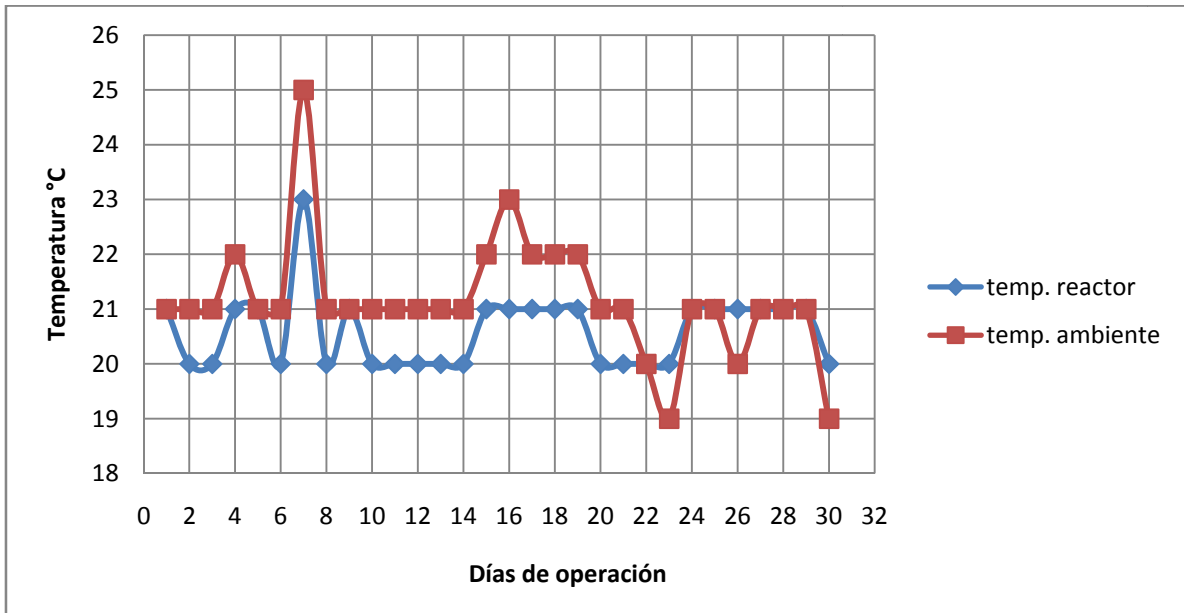


Figura IV.6: Representación de la temperatura ambiente y del reactor para la carga C



IV. 1.3 PRODUCCIÓN DIARIA DE BIOGÁS

La Tabla IV.5 y la Figura IV.7 muestran la producción de biogás medida para la carga A. Los puntos en la figura poseen un código de colores con base a pruebas de combustión determinando si: a) El gas no encendía (amarillo), b) Llama no autosustentable (verde) y c) Llama autosustentable (azul). La Tabla IV.6 y la Figura IV.8 tienen la misma función para la carga B.

Figura IV.7: Producción diaria de biogás para la carga A

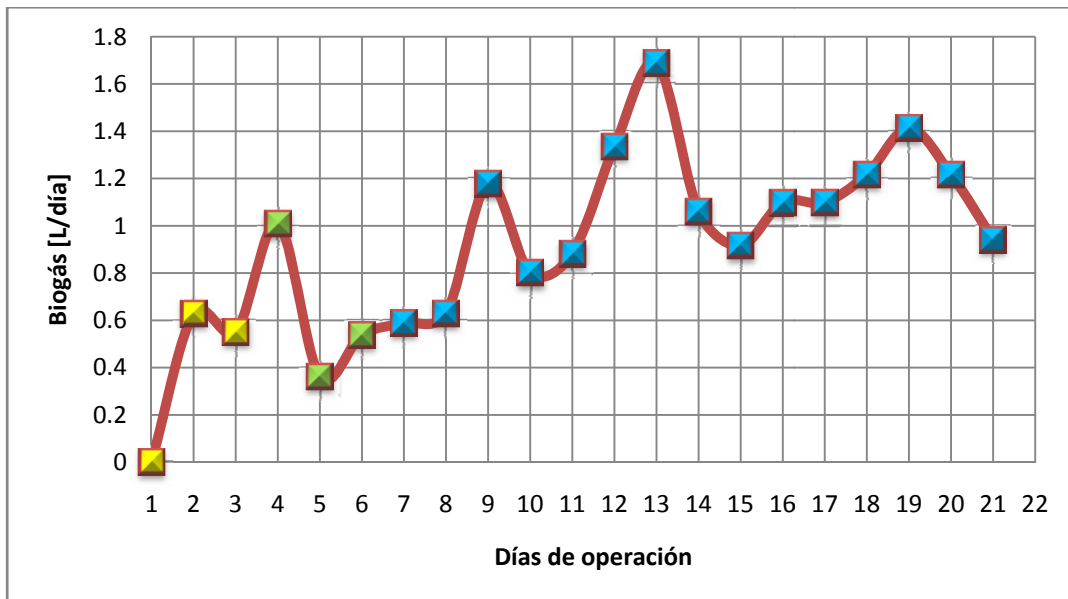


Tabla IV.5: Resultados tabulares del biogás producido por la carga A

Días de operación	Biogás producido L	Combustión
1	0	CO ₂
2	0.628	CO ₂
3	0.549	CO ₂
4	1.009	CO ₂ -CH ₄
5	0.361	CO ₂ -CH ₄
6	0.537	CO ₂ -CH ₄
7	0.589	CH ₄
8	0.628	CH ₄
9	1.178	CH ₄
10	0.801	CH ₄
11	0.883	CH ₄
12	1.335	CH ₄
13	1.688	CH ₄
14	1.060	CH ₄
15	0.914	CH ₄
16	1.099	CH ₄
17	1.099	CH ₄
18	1.217	CH ₄
19	1.413	CH ₄
20	1.217	CH ₄
21	0.942	CH ₄
Promedio	1.071	CH₄

Figura IV.8: Producción diaria de biogás para la carga B

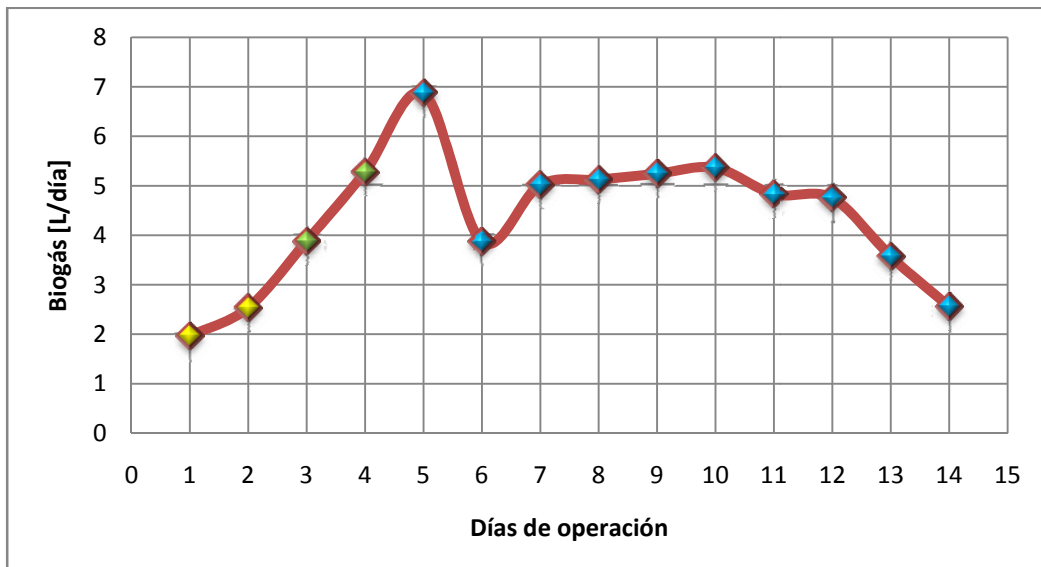


Tabla IV.6: Resultados tabulares del biogás producido por la carga B

Día	Biogás L	Combustión
1	1.963	CO ₂
2	2.536	CO ₂
3	3.883	CH ₄ -CO ₃
4	5.281	CH ₄ -CO ₂
5	6.868	CH ₄
6	3.868	CH ₄
7	5.018	CH ₄
8	5.124	CH ₄
9	5.242	CH ₄
10	5.364	CH ₄
11	4.830	CH ₄
12	4.751	CH ₄
13	3.573	CH ₄
14	2.556	CH ₄
Promedio	4.719	CH₄

Las Figura IV.9 y IV.10 muestran la producción de biogás, temperatura y pH en unidades normalizadas para la carga A y B respectivamente fin de permitir un análisis de la relación entre estos tres factores.

Como se puede observar en las Figuras IV.7 y IV.8 la producción de biogás diaria está estrechamente relacionada con los parámetros temperatura y pH. Cuando la temperatura o pH disminuyen a valores poco favorables también lo hace la curva de producción de diaria de biogás.

Tal como se esperaba, el comportamiento de la curva de producción diaria de biogás y el de la curva de pH para la carga A resultan erráticos y pocos predecibles.

Para ambas cargas se puede colaborar el concepto de tiempo máximo de retención o tiempo de residencia hidráulica óptimo (TRHO), es decir, la existencia de un punto máximo en la curva de producción tras el cual la producción de biogás desciende. Para la carga A éste punto fue alcanzado el día trece (13) mientras que para la carga B éste se ubica en el día diez (10), descartándose el pico del día cinco debido al marcado aumento de temperatura. El tiempo de retención máximo es menor en la carga B debido a que la temperatura de operación fue mayor y a que las bacterias ya se encontraban mejor adaptadas al medio.

El tiempo de retención máximo disminuye en función de la temperatura (mayor temperatura = menor tiempo de retención) y a la estabilidad de las colonias bacterianas dentro del reactor.

Otro punto importante a apreciar es el marcado efecto de los cambios bruscos de temperatura sobre la producción de biogás. Si se observa, los días 13 a 14 y 5 a 6 para la carga A y B

respectivamente, puede distinguirse un marcado desplome en la producción de biogás frente a un cambio notable de temperatura, aún cuando el pH se mantiene poco variable.

Figura IV.9: Parámetros de medición para la carga A lo largo del tiempo de operación del reactor

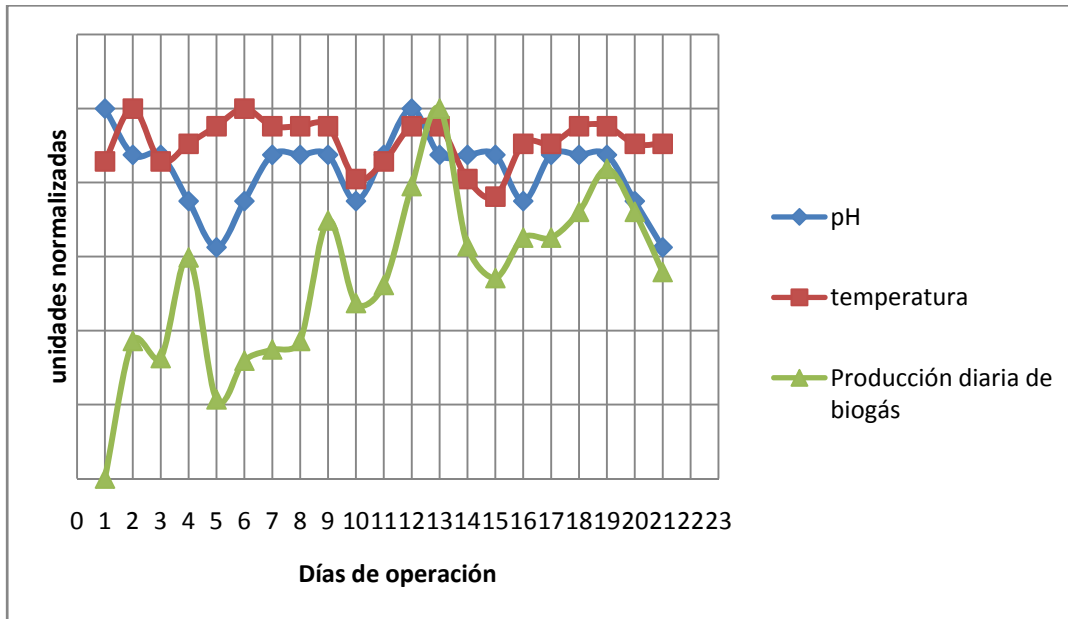
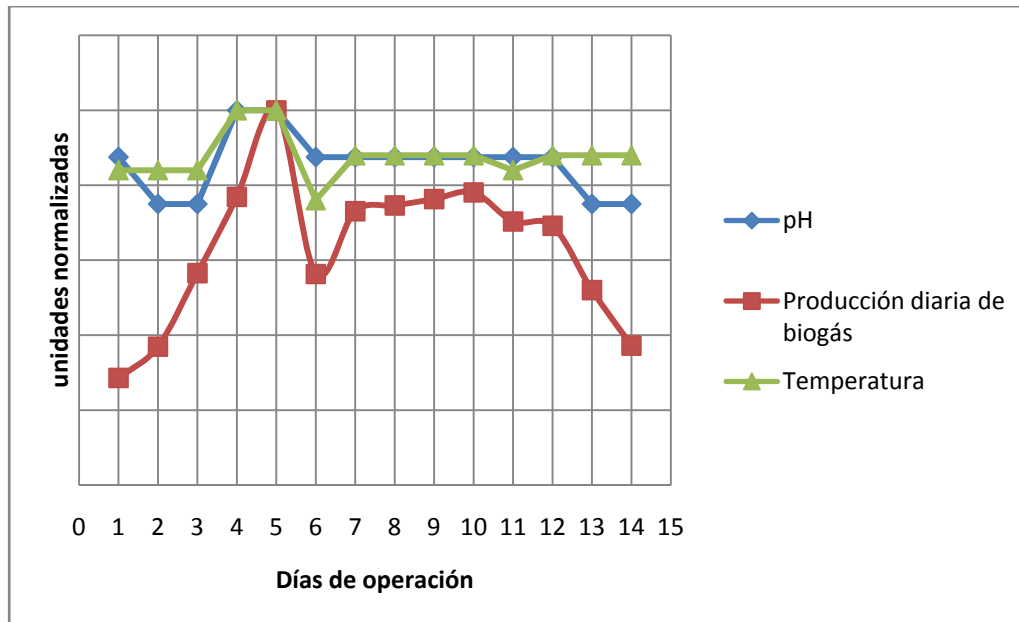


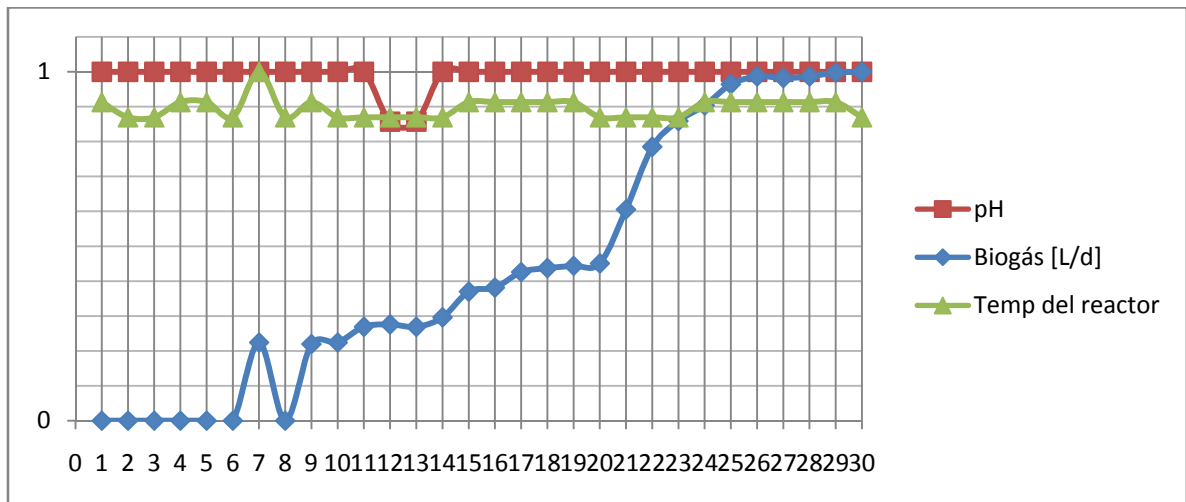
Figura IV.10: Parámetros de medición para la carga B a lo largo del tiempo de operación del reactor



Para la carga C se puede observar (Figura IV.11) un comportamiento bastante estable y “bueno” para los parámetros de pH y temperatura. Sin embargo, la producción diaria de biogás es bastante baja. Éste comportamiento es atribuible al hecho que la relación substrato: Agua es deficiente. Al no contar con cantidades de agua suficientes, escasez de donadores de electrones, las bacterias no

pueden llevar a cabo sus procesos de catabolización. Lo anterior es comparable a una indigestión por exceso de alimento.

Figura IV.11: Parámetros de medición para la carga C a lo largo del tiempo de operación del reactor



IV. 1.4 PRODUCCIÓN DIARIA ESPECÍFICA DE BIOGÁS

Si bien las curvas de producción diaria de biogás muestran y describen el comportamiento de los reactores de prueba, no pueden ser utilizadas para reactores de volumen distinto a los mismos. Para ello, es necesaria la construcción de la gráfica de producción diaria específica (pde), la cual permite estimar la producción diaria de biogás para un reactor de cualquier volumen, siempre y cuando éste sea alimentado por el mismo sustrato del reactor de prueba y se le mantenga a una temperatura constante.

La construcción de la curva se realiza dividiendo los valores de producción diaria de biogás entre el volumen del reactor. Considerándose como característico el valor en el cual la curva tiene un comportamiento poco variable, usualmente el punto correspondiente al tiempo máximo de residencia (TRHO). Las Figura IV.12 a IV.13 muestran las curvas de producción diaria específica de biogás para las cargas A, B y C en la operación del reactor anaerobio.

Las mediciones de contenido de CO_2 mostraron concentraciones de 48, 45 y 81% para las cargas A, B y C respectivamente. A fines de simplificación se considera que las trazas de gases representan el 1% del volumen de gas para todas las cargas.

La Tabla IV.7 muestra una comparación entre los parámetros medidos para las tres cargas de experimentación, así mismo se incluyen los resultados obtenidos por otros estudios.

Figura IV.12: Producción diaria específica de biogás para un sustrato de las características de la carga A

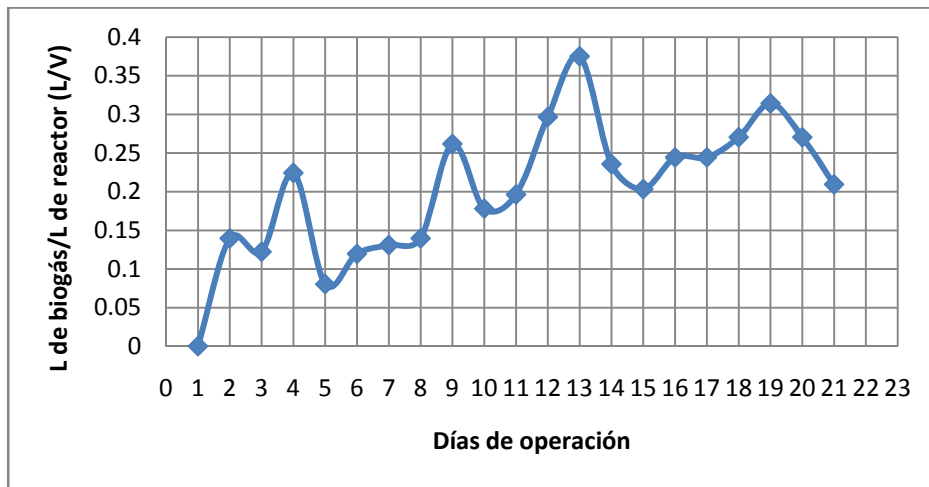


Figura IV.13: Producción diaria específica de biogás para un sustrato de las características de la carga B

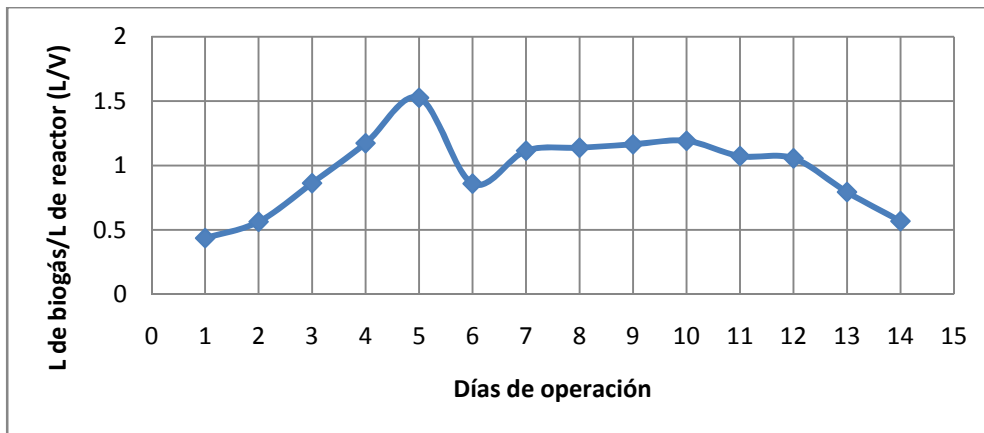


Figura IV.14: Producción diaria específica de biogás para un sustrato de las características de la carga C



Tabla IV.7: Comparación de resultados promedio para diversas cargas de operación de reactores anaerobios

Carga	pH	Temp. de operación n °C	L biogás/ día	$L_{\text{biogás}}/$ L_{reactor}	TRHF	%CH ₄	Substrato	% Inóculo	%ST	Agua: Substrato
Resultados obtenidos en la tesis										
A	6.6	19.09	1.071	0.278	17	51	FO/RSU	30	10	2:1
B	6.8	21.92	4.719	1.150	9	54	FO/RSU	30	11	1.5:1
C	7.0	20.60	0.345	0.077	>30	18	FO/RSU	30	18	1:2
Resultados de Duque y col., 2006										
D	6.7	25.00	7.0	1.40	26	60	purines	30	11	1.3:1
E	6.2	25.00	5.2	1.40	26	60	Purines	30	11	1.3:1
F	6.4	30.00	8	1.51	22	62	purines	30	11	2:1
G	6.6	37.50	12	1.65	17	61.5	purines	30	11	2:1
Resultados Rodríguez y col., 1995										
H	6.8	33.00	4	1.0	38	55	bora- aguas negras	33	10	-
Resultados Pedraza y col, 2000										
I	6.85	18.00	98.8	0.19	15	-	purines- aguas negras	33	10	-

Una vez que se tiene la curva de producción diaria específica de biogás basta con multiplicar el factor L/V característico por el volumen de reactor deseado (V) a fin de estimar la producción de biogás para cualquier volumen de reactor a la temperatura deseada.

IV. 1.5 CÁLCULOS PARA POSIBLE ESCALAMIENTO DEL REACTOR ANAEROBIO

IV. 1.5.1 SUBSTRATO

En base a los datos obtenidos mediante la carga B se estimará el potencial de producción de biogás diaria empleando como substrato la totalidad de la FO/RSU, de un hogar de cuatro miembros promedio. Para tal fin se realizaron mediciones de la FO/RSU (Kg) producida diariamente por tres hogares en distintas zonas del D.F. Dos de ellos (I y II) consisten de 4 miembros mientras que el tercero de 5. Se estima que en promedio se producen 1.36 kg de FO/RSU. La Tabla IV.8 muestra las mediciones realizadas.

Tabla IV.8: Mediciones de substrato disponible

Día	[kg]			
	Hogar I	Hogar II	Hogar III	
1	1.6	1.4	1.7	
2	1.3	1.2	1.8	
3	1.4	1.3	1.4	
4	1.2	1.2	1.5	
5	1.5	1	1.4	
6	1.2	1.1	1.6	
7	1.3	1.5	1.7	
8	1.3	1.4	1.6	
9	1.2	1.3	1.7	
10	1.4	1.4	1.8	
11	1.2	1.2	1.4	
12	1.3	1.1	1.3	
13	1.4	1	1.6	
14	1.4	1.7	1.7	
15	1.3	1.5	1.8	
16	1.3	1.5	1.5	
17	1.4	1.2	1.8	
18	1.6	1.2	1.4	
19	1	1.4	1.6	
20	1.2	1.3	1.4	
21	1.5	1.6	1.5	
22	1.7	1.2	1.5	
23	1.3	0.9	1.3	
24	1.4	1.2	1.6	
25	1.4	1.3	1.7	
26	1.2	0.98	1.5	
27	1.2	1	1.3	
28	1.1	1.3	1.8	
29	1.3	1.2	1.6	
30	1.3	1.2	1.7	
Promedio	1.33	1.26	1.57	1.39

Considerando densidades de 1.41 kg/L y 1.21 kg/L para sustrato e inóculo respectivamente, puede determinarse la cantidad de sustrato diario disponible en litros; al igual que la cantidad necesaria de agua para alcanzar la concentración de ST requerida (11%).

$$\text{Sustrato diario disponible } \frac{\text{L}}{\text{día}} = \left(\frac{\text{kg de sustrato}}{\text{día}} \right) \left(\frac{1}{1.41 \text{ kg}} \right) + \left(\frac{\text{kg de inóculo}}{\text{día}} \right) \left(\frac{1}{1.21 \text{ kg}} \right) \quad (\text{IV-1})$$

$$\text{Agua requerida } \frac{\text{L}}{\text{día}} = (1.5) \text{Sustrato diario disponible } \frac{\text{L}}{\text{día}}$$

Donde: kg de inóculo = (kg de Sustrato)(0.30)

Para el caso de estudio tenemos:

$$\text{Sustrato diario disponible } \frac{\text{L}}{\text{día}} = (1.39) \left(\frac{1}{1.41} \right) \frac{\text{L}}{\text{día}} + (1.39)(0.3) \left(\frac{1}{1.21} \right) \frac{\text{L}}{\text{día}} = 1.33 \frac{\text{L}}{\text{día}}$$

$$\text{Agua requerida } \frac{\text{L}}{\text{día}} = 1.99 \frac{\text{L}}{\text{día}} = \left(1.33 \frac{\text{L}}{\text{día}} \right) (1.5)$$

IV. 1.5.2 VOLUMEN DEL REACTOR ANAEROBIO

Una vez calculado el sustrato diario disponible se debe calcular el volumen de reactor necesario para el aprovechamiento de éste:

$$\text{Volumen de reactor} = (\text{Sustrato diario disponible} + \text{Agua requerida}) \frac{\text{L}}{\text{día}} (\text{TRHO} + 5) \text{ días} \quad (\text{IV-2})$$

Donde:

$$\text{Sustrato diario disponible } \frac{\text{L}}{\text{día}} = 1.33 \frac{\text{L}}{\text{día}}$$

$$\text{Agua requerida } \frac{\text{L}}{\text{día}} = 1.99 \frac{\text{L}}{\text{día}}$$

TRHO = 12 días

Entonces se tiene que el volumen de reactor necesario es:

$$\text{Volumen de reactor} = (1.33 + 1.99) \frac{\text{L}}{\text{día}} (12 + 5) \text{ días} = 56.44 \text{ L}$$

IV. 1.5.3 ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DIARIA DE BIOGÁS

Como se ha mencionado, para estimar la producción diaria de biogás del reactor calculado a 22°C, basta con multiplicar el volumen de reactor calculado por el factor característico de la curva de producción diaria específica de biogás.

$$\text{Producción diaria de biogás } L_{\text{biogás}} = \left(\text{Producción diaria específica } \frac{L_{\text{biogás}}}{L_{\text{reactor}}} \right) (\text{volumen de reactor } L_{\text{reactor}}) \quad (\text{IV-3})$$

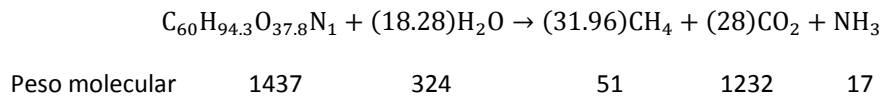
$$\text{Producción diaria de biogás } L_{\text{biogás}} = \left(1.15 \frac{L_{\text{biogás}}}{L_{\text{reactor}}}\right) (56.44 L_{\text{reactor}})$$

$$\text{Producción diaria de biogás} = 64.90 L_{\text{biogás}}$$

IV.1.5.4 ESTIMACIÓN TEÓRICA DE APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS

En base a las ecuaciones II-7 a la II-16 se puede realizar una estimación del grado de aprovechamiento del potencial de producción de biogás. Tal análisis se realiza a continuación.

Empleando la composición estándar de la materia orgánica se tiene:



Cálculo del contenido de sólidos volátiles biodegradables (SVB) en la FO/RSU a fin de conocer la materia degradable en el reactor, empleando la ecuación II-9:

$$SVB = (1.35 \text{ kg})(1 - 0.71)(0.275)(FSVB)$$

Donde con la ecuación II-2 y la Tabla II.14 se puede conocer el contenido de lignina en los SV:

$$FSVB = 0.83 - (0.028)(0.357) = 0.82$$

Por lo tanto:

$$SVB = (1.39)(1 - 0.71)(0.275)(0.82) = 0.091 \text{ kg}$$

Posteriormente se debe considerar que tan solo cerca del 90% de SVB podrá ser convertido en gas, debido a la composición del material de las paredes celulares.

$$SVB_g = (SVB)(0.90) = (0.091)(0.9) \text{ kg}$$

$$SVB_g = 0.081 \text{ kg}$$

Para determinar el peso del metano y dióxido de carbono derivado del paso anterior, con las ecuaciones II-10 y II-11 respectivamente se tiene:

$$\text{Peso del metano} = (0.081) \frac{512}{1437} = 0.028 \text{ kg}$$

$$\text{Peso del dióxido de carbono} = (0.081 \text{ kg}) \frac{1232}{1437} = 0.069 \text{ kg}$$

El siguiente paso es convertir el peso del metano y dióxido de carbono a volumen mediante el empleo de sus densidades (0.718 y 1.979 kg/m³) en las ecuaciones II-12 y II-13.

$$\text{Volumen de metano} = \frac{0.028}{0.718} \text{ m}^3 = 0.039 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de dióxido de carbono} = \frac{0.069}{1.979} \text{ m}^3 = 0.034 \text{ m}^3$$

Una vez obtenido el volumen de metano y dióxido de carbono, se debe obtener el porcentaje de estos presentes en la mezcla mediante las ecuaciones II-14 y II-15.

$$\% \text{ metano} = \frac{0.039 \text{ m}^3}{(0.039 \text{ m}^3 + 0.034 \text{ m}^3)} (100) = 53.42\%$$

$$\% \text{ dióxido de carbono} = \frac{0.034 \text{ m}^3}{(0.034 \text{ m}^3 + 0.039 \text{ m}^3)} (100) = 46.57\%$$

El último paso en este procedimiento es determinar la cantidad de biogás generado por unidad de masa seca de los SVB transformables a gas.

$$\frac{\text{m}^3 \text{ Biogás}}{\text{kg SVB}} = \frac{(0.039 \text{ m}^3 + 0.034 \text{ m}^3)}{0.081 \text{ kg}}$$

$$\frac{\text{m}^3 \text{ Biogás}}{\text{kg SVB}} = 0.9012 \frac{\text{m}^3}{\text{kg SVB}}$$

Ahora es posible calcular el volumen total de biogás desprendible ($v_{T\text{Biogás}}$) por los kg de SVB agregados, así como realizar una estimación de aprovechamiento del mismo:

$$v_{T\text{Biogás}_{\text{teorico}}} = \left(0.9012 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{kg SVB}} \right) (0.091 \text{ kg SVB}) = 0.082 \text{ m}^3_{\text{biogás}}$$

$$v_{T\text{Biogás}_{\text{teorico}}} = 82.00 \text{ L}_{\text{biogás}}$$

Considerando que el volumen total de biogás producido por la carga B hasta el día 12 (TRHO) es 45.15 L se tiene:

$$\% \text{ aprovechamiento} = \frac{v_{T\text{Biogás}_{\text{practico}}}}{v_{T\text{Biogás}_{\text{teorico}}}} (100) = \frac{64.9 \text{ L}}{82.00 \text{ L}} (100) = 79.15\%$$

IV. 1.5.5 POTENCIAL ENERGÉTICO DEL BIOGÁS EN GENERACIÓN ELÉCTRICA

Con los resultados obtenidos en la sección. IV.4 la producción de biogás estimada es de $57.28 \frac{\text{L biogás}}{\text{día}}$

Aunque existe la posibilidad de que una vez implementado el sistema de aprovechamiento de éste biogás una fracción del mismo pueda aprovecharse en un sistema de calefacción, logrando con ésto poder incrementar la temperatura del reactor de 25°C a aproximadamente 35-40°C. Ésto podría incrementar la producción diaria específica de biogás del substrato hasta valores cercanos a

$1.5 \frac{l_{\text{biogás}}}{l_{\text{volumendeldigestor}}}$ (actualmente a 22°C es de 1.15), lo cual incrementaría la producción de biogás diaria a 73.12 $l_{\text{biogás}}$.

Por otro lado el contenido energético del biogás producido se estimó con base a su composición másica (54% metano, 45% CO₂ y 1% de trazas). mediante el empleo del software termoflex de termoflow siendo su poder calorífico superior de:

$$18262 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}_{\text{biogás}}}$$

Con una densidad de aproximadamente $\rho = 0.685 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Con los datos anteriores puede calcularse el contenido energético del biogás en watts químicos, a fin de estimas su capacidad de generación eléctrica.

El primer paso es convertir el flujo volumétrico de biogás a un flujo másico, multiplicando la producción de biogás al día por su densidad, posteriormente el flujo másico es convertido a kg/s . Finalmente se multiplica el flujo másico por el poder calorífico superior del biogás, para obtener los $W_{\text{químicos}}$ contenidos en este

$$\left(\frac{57.27 \text{ L}_{\text{biogás}}}{\text{d}} \right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) \left(\frac{0.685 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \right) \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) \left(\frac{18262 \text{ kJ}}{\text{kg}_{\text{biogás}}} \right) = 8.29 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 8.29 W_{\text{químicos}}$$

IV. 1.5.6 DISEÑO TÉRMICO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN

GENERACIÓN DE VAPOR Y ELECTRICIDAD

Conociendo la capacidad de generación de potencia química del sistema, se calcula la cantidad másica de vapor a generar.

Considerando que en un sistema real la eficiencia está entre 0.8 -0.92, se empleara una eficiencia de generador de vapor de aproximadamente 0.5, debido a que se planea el uso de materiales originalmente destinados a otras funciones.

CONDICIONES DEL AGUA Y VAPOR

En el estado 1.5 las condiciones del agua de alimentación son 60°C, este valor se debe a un condensador que se pondría en el sistema para recuperar el agua y la entalpia a esa temperatura es de $h_f = 251.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Definiendo las condiciones del vapor generado como 3 bar_{abs} y 240 °C para el estado 2 del diagrama TS (Figura IV.15) puede conocerse la entalpia del estado 4

$$h_{g4} = 2947.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ En el estado 4 del diagrama TS}$$

Definiendo las propiedades del vapor en el estado 5 como 0.85 para la calidad de vapor deseada y una temperatura de 35°C (por emplear agua a temperatura ambiente como fuente de enfriamiento):

$$x = 0.85 \quad y = 0 \text{ bar}_{abs}, 35^\circ\text{C}$$

Obtenemos los siguientes datos.

$$h_f = 151.53 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_g = 2567.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

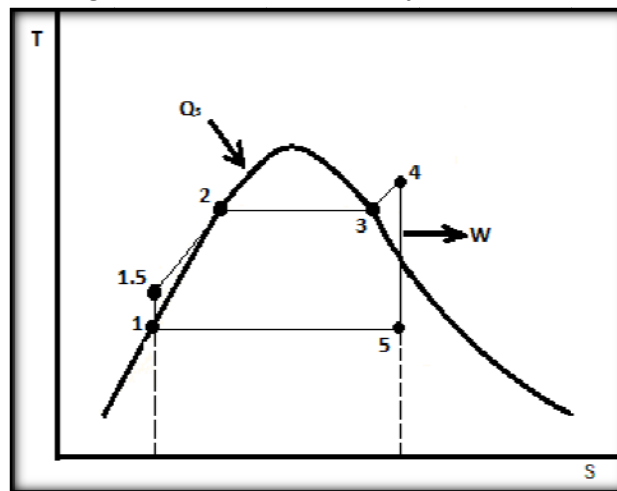
Para conocer la entalpia de la mezcla (estado 5) es necesario el empleo de la ecuación IV-4

$$h_5 = h_g(x) + (1 - x)(h_f) \quad (\text{IV-4})$$

$$h_5 = 2567.4 \times 0.85 + (1 - 0.85)(151.53) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2205.02 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Mostrado lo anterior en un diagrama TS, tenemos:

Figura IV 15: Diagrama TS del ciclo de trabajo del sistema de generación



Calculo de la masa de vapor generado.

$$W_{\text{químicos}} = m_a (h_{g4} - h_f) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (0.5) \quad (\text{IV-5})$$

$$0.00829 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = m_a (2947.3 - 251.4) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (0.5)$$

$$m_a = \left(1347.95 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)^{-1} \left(0.00829 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right)$$

$$m_a = 6.150 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

IV.1.5.7 DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD ELÉCTRICA DEL SISTEMA

Con los datos calculados anteriormente (masa de vapor generado y entalpías h_5 y h_4) puede calcularse la potencia mecánica generada por una turbina con una eficiencia de 0.65, considerando que la misma sería construida a partir de la modificación de una bomba centrífuga.

Potencia mecánica generada en la turbina:

$$P_m = (\text{flujo másico de vapor generado})(h_4 - h_5)(\eta \text{ de la turbina}) \quad (\text{IV-6})$$

$$P_m = \left(6.150 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) (2947.3 - 2205.02) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (0.65)$$

$$P_m = 2.97 \times 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$P_m = 2.97 \text{ W}_{\text{mecánicos}}$$

GENERACIÓN ELÉCTRICA

Para calcular la potencia eléctrica a generar basta con multiplicar la potencia mecánica de la turbina por la eficiencia del generador acoplado, en este caso considerada como 0.7, siendo este último un dinamo de bicicleta.

$$\text{Potencia eléctrica} = (\text{Potencia mecánica})(\eta \text{ del generador}) \quad (\text{IV-7})$$

Sustituyendo

$$P_e = (2.97)(0.7) = 2.09 \text{ W}_{\text{eléctricos}}$$

A fin de conocer la eficiencia bruta del sistema se emplea la ecuación:

$$\eta_{\text{Total bruto}} = \frac{\text{Potencia eléctrica generada}}{\text{Potencia química suministrada}} \quad (\text{IV-8})$$

$$\eta_{\text{Total bruto}} = \frac{2.09}{8.29} = 0.2521$$

$$\eta_{\text{total bruto}} = 25.21\%$$

Como se puede apreciar la potencia generada con la cantidad de biogás generado empleando únicamente los desechos orgánicos diarios de una casa, no son suficientes para satisfacer la demanda energética de un hogar promedio, cuya demanda máxima es aproximadamente 2 kW.

Para conocer la cantidad de biogás necesario para satisfacer la potencia requerida puede realizarse el siguiente procedimiento.

De la ecuación (IV-8) se tiene:

$$\text{Potencia química suministrada} = \frac{\text{Potencia eléctrica generada}}{\eta_{\text{Total bruto}}}$$

$$\text{Potencia química suministrada} = \frac{2 \text{ kW}}{0.2521}$$

$$\text{Potencia química suministrada} = 7.93 \text{ kW}_{\text{químicos}}$$

Calculando el volumen de biogás requerido para la potencia química calculada:

$$\left(\frac{\text{Volumen m}^3_{\text{biogás}}}{\text{d}} \right) = \frac{7.93 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{\left(\frac{0.685 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \right) \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) \left(\frac{18262 \text{ kJ}}{\text{kg}_{\text{biogás}}} \right)} = 54.79 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Conociendo la generación diaria específica puede calcularse el volumen del digester requerido

$$\text{Volumen de digester} = \frac{\text{Volumen de biogás}}{\text{Generación diaria específica}}$$

$$\text{Volumen de digester} = \frac{54.79}{1.15} = 47.64 \text{ m}^3$$

Una vez calculado el volumen de digester se calcula el sustrato diario requerido

$$\text{Volumen de digester} = (\text{Sustrato diario requerido} + \text{agua})(\text{TRH} + 5)$$

$$\text{sustrato diario requerido} = \text{MOR} + 0.3(\text{MOR}) = 1.3\text{MOR}$$

$$\text{Agua} = (1.5)\text{sustrato diario requerido} = (1.5)(1.3)\text{MOR} = 1.95 \text{ MOR}$$

$$\text{Volumen de digester} = (1.3\text{MOR} + 1.95\text{MOR})(\text{TRH} + 5)$$

$$\text{Volumen de digester} = 3.25\text{MOR} (\text{TRH} + 5)$$

Donde MOR = materia orgánica requerida diariamente y TRH= 12 días

$$\frac{\text{Volumen de digester m}^3}{\text{TRH} + 5} \frac{1}{\text{d}} = 3.25\text{MOR} \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

$$\text{MOR} = \frac{\text{Volumen de digestor m}^3}{55.25 \text{ d}}$$

Para éste caso:

$$\text{MOR} = \frac{47.64 \text{ m}^3}{55.25 \text{ d}} = 0.86 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Debido a que éste resultado está dado en volumen, para conocer su valor en kg se multiplica por la densidad que tiene la basura que es de $1,410 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$$\text{MOR} = 0.97 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \times 1410 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1,212 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

IV.2 MÁQUINA DE VAPOR

IV.2.1 POTENCIA MECÁNICA DE LA MÁQUINA DE VAPOR

A fin de conocer la potencia mecánica de la máquina de vapor se realizaron mediciones experimentales del par de torsión y la velocidad angular.

Para las pruebas se emplearon dos tipos de combustible (alcohol sólido y gas butano) y tres tipos de quemador (mechero bunsen, quemador de fábrica, un quemador para gas butano y quemador para biogás).

Se realizaron cuatro experimentos cada uno con dos pruebas. La primera para conocer la velocidad angular y la segunda para conocer el par de torsión. La combinación para cada experimento fue la siguiente

1. Quemador proporcionado por el fabricante: Alcohol sólido
2. Mechero de Bunsen: Gas
3. Quemador de cobre para gas butano: Gas
4. Quemador de cobre para biogás: Biogás

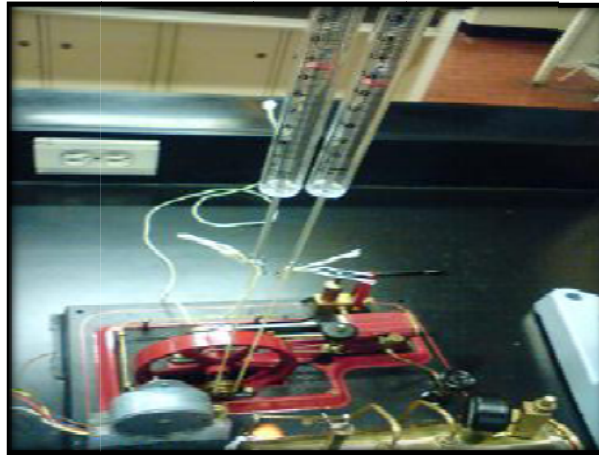
PRUEBA DE PAR DE TORSIÓN

Para la prueba de par de torsión se empleó los siguientes instrumentos:

- Dos dinamómetros de 5 N
- Cuerda flexible de algodón
- Dos soportes universales completos
- Dos mariposas de sujeción
- Varilla de 30 cm

La configuración del material para la prueba de torsión se puede visualizar en la siguiente figura (Figura IV.16).

Figura IV.16 Configuración experimental para la medición del par de torsión

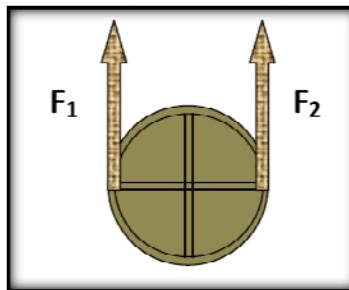


Se utilizaron los soportes universales, varilla y mariposas de sujeción para crear una configuración en la cual los dos dinamómetros penden verticalmente, ambos sujetos por su parte inferior con la cuerda, la cual se hace pasar entre la ranura del volante inferior acoplado a la flecha. Una vez que se ha puesto en marcha la máquina de vapor con la configuración anterior, las correas friccionan sobre el volante acoplado a la flecha que tiene un radio de contacto r .

Con base a la configuración de la Figura IV.17, F_1 y F_2 son las fuerzas de tensión en las correas, las cuales son registradas por cada uno de los dinamómetros. Se sabe, que el par resultante τ que se opone a la fricción de la cuerda está dada por:

$$\tau = |F_1 - F_2|r \text{ Nm} \quad (\text{IV-9})$$

Figura IV.17 Diagrama de fuerzas de fricción



Así, la prueba se resume a poner en marcha la máquina hasta su estabilización y registrar la magnitud de cada uno de los dinamómetros una vez que ha quedado detenida la marcha del volante.

PRUEBA DE VELOCIDAD ANGULAR

Para realizar estas pruebas fue necesaria la construcción de un dispositivo digital que nos permitiera obtener la velocidad angular, ya que los dispositivos que se tuvieron al alcance (tacómetros analógicos y digitales) no eran apropiados por sus dimensiones.

El dispositivo diseñado se construyó empleando sensores infrarrojos y un microcontrolador, la confiabilidad del dispositivo queda garantizada al tratarse de dispositivos digitales cuyos resultados fueron directamente registrados en la computadora a través de una interfaz microcontrolador-Pc.

Experimento 1

Las mediciones llevadas a cabo empleando el alcohol líquido como combustible, presentaron el reto de una alimentación de combustible inconstante debido al agotamiento y recarga de combustible. El tiempo necesario para alcanzar la presión de operación fue de 22 min. Una puesta en marcha del generador de vapor requería cuatro cargas de alcohol. El suministro inconstante de calor ocasionó que el sistema no lograra el equilibrio, es decir, el volante aceleraba desde una velocidad angular nula hasta una máxima sin estabilizar su velocidad en ningún momento.

A continuación se presentan los datos experimentales obtenidos por la velocidad angular (Figura IV.18) y par de torsión (Tabla IV.9) obtenidos durante el experimento 1. Las rpm presentan una tendencia a la estabilización en el valor de 1159.8 rpm.

Figura IV.18: Mediciones de velocidad angular para el experimento 1

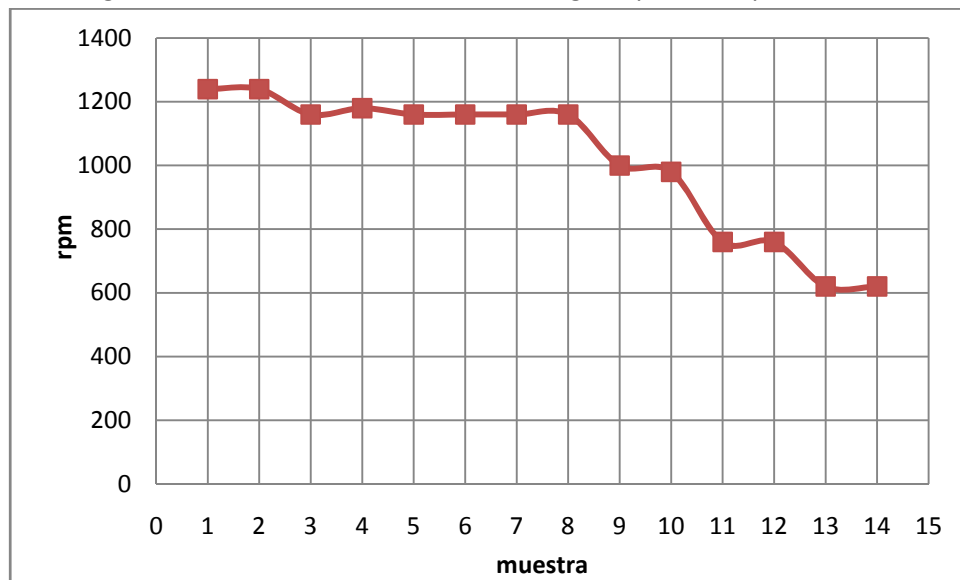


Tabla IV.9: Fuerza de freno neta para el experimento 1

Evento	$ F_1 - F_2 \text{ N}$	Torque N m
1	0.9	0.045
2	1.2	0.060
3	0.8	0.040
4	0.9	0.045
Promedio	0.95	0.0475

Experimento 2

Aprovechando la remoción temporal de la caseta de la caldera para minimizar las pérdidas de calor por las paredes de la caseta, llevada a cabo por prestadores de servicio social, (Figura IV.19) se empleó un mechero Bunsen como fuente de energía térmica. El mechero Bunsen representó una fuente de energía constante y de un poder calorífico mayor a aquel del alcohol sólido. El tiempo necesario para alcanzar la presión de operación se redujo a tan solo 5 minutos.

Figura IV.19: Calentamiento mediante mechero Bunsen



Pese a que la reducción del tiempo de espera se considera un factor positivo esto trajo como consecuencia una pérdida de estabilidad del sistema, el cual generó una cantidad importante de vibraciones mecánicas que dificultaban las mediciones. Las vibraciones resultaron tan intensas que se decidió detener el suministro de energía calórica tras haber alcanzado la presión de operación.

La Figura IV.20 muestra las mediciones de velocidad angular para este experimento. Puede observarse una tendencia a la estabilización en las 1519.98 rpm (25.33 rps). Por su parte la Tabla IV.10 muestra los resultados obtenidos en la prueba de medición de torque.

Figura IV.20: Mediciones de velocidad angular para el experimento 2

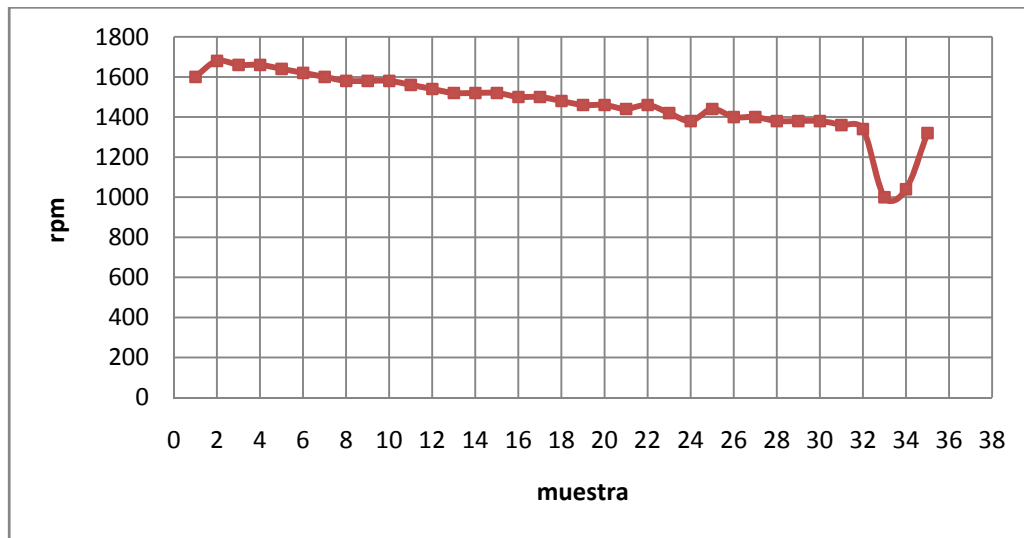


Tabla IV.10: Fuerza de freno neta para el experimento 2

Evento	$ F_1 - F_2 $ N	Torque N m
1	1.5	0.075
2	1.2	0.060
3	1.2	0.060
4	1.5	0.075
Promedio	1.3	0.0675

Experimento 3

El quemador de gas (Figura IV.21) se presentó como una fuente de energía de flujo constante. Sin embargo, el diseño inicial era deficiente en cuanto a la combustión, debido a que los orificios del mismo eran demasiado grandes ocasionando un flujo de gas excesivo para llevar a cabo eficiente combustión. Lo anterior implicaba la generación de hollín lo cual originaba capas térmicas aislantes teniendo como resultado una deficiente transferencia de calor. Se realizó un segundo diseño disminuyendo el radio de los orificios del quemador, de ésta manera se mejoró la eficiencia de combustión eliminando la producción de hollín pero aún se mantiene la incapacidad de producir una flama azul (combustión casi total). El tiempo requerido para alcanzar la presión de 1.5 bar fue 20 minutos.

Figura IV.21: Quemador de gas

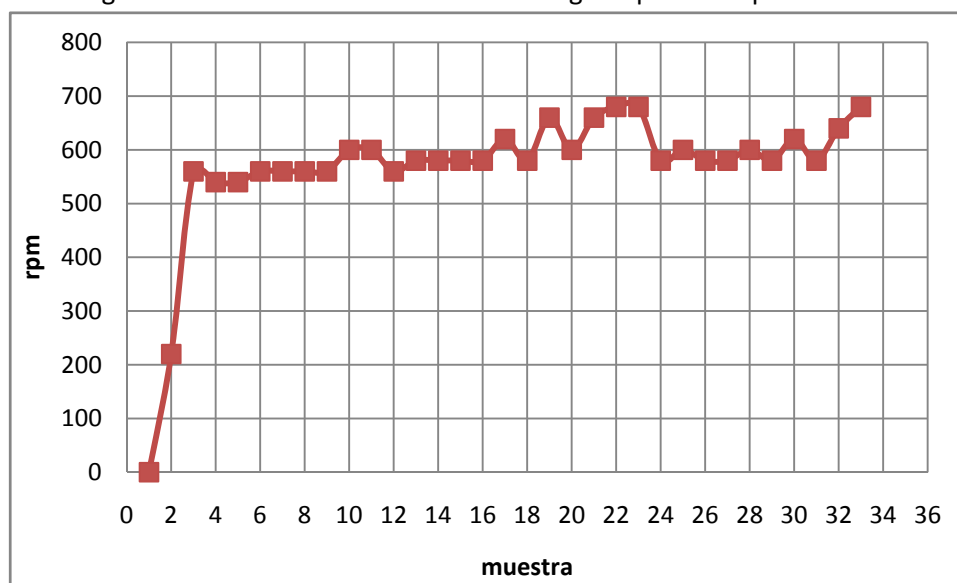


La Figura IV.22 muestra las mediciones de velocidad angular para este experimento. Puede observarse que la tendencia a la estabilización eran 559.8 rpm (9.33 rps). Por su parte la Tabla IV.11 muestra los resultados obtenidos en la prueba de medición de torque.

Tabla IV.11: Fuerza de freno neta para el experimento 3

Evento	$ F_1 - F_2 \text{ N}$	Torque N m
1	1.2	0.060
2	1.2	0.060
3	1.5	0.075
4	1.2	0.060
Promedio	1.27	0.063

Figura IV.22: Mediciones de velocidad angular para el experimento 3



Experimento 4

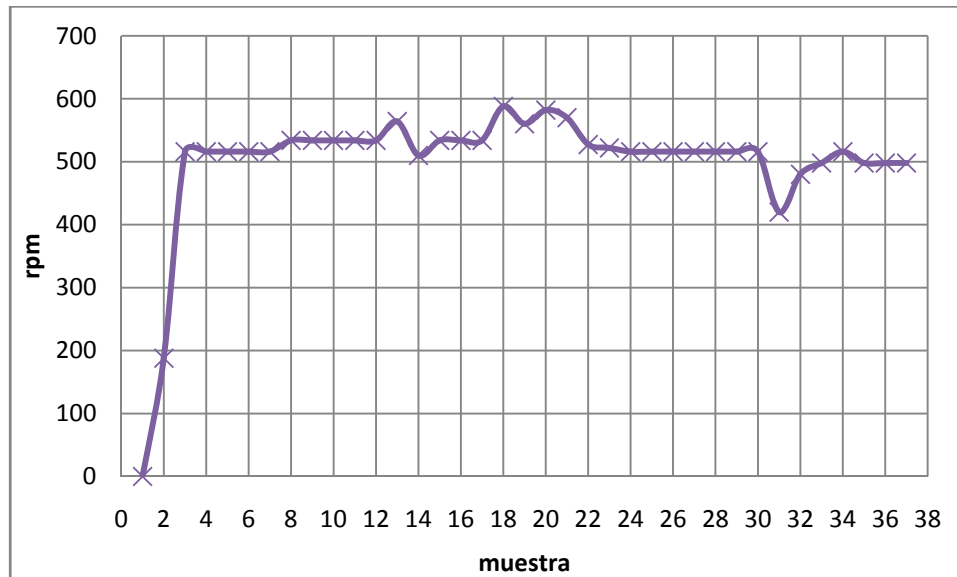
Para éste experimento se usó el quemador s. Como es de esperarse el tiempo necesario para alcanzar el punto de operación ($P= 1.5$ bar) de la máquina de vapor es mayor al requerido (21 minutos) cuando se usa gas butano, debido a la diferencia del poder calorífico superior de cada combustible y su densidad.

La Figura IV.23 muestra las mediciones de velocidad angular para éste experimento. Puede observarse que la tendencia a la estabilización era 516 rpm (8.6 rps). Por su parte la Tabla IV.12 muestra los resultados obtenidos en la prueba de medición de torque.

Tabla IV.12: Fuerza de freno neta para el experimento 4

Evento	$ F_1 - F_2 $ N	Torque N m
1	1.2	0.060
2	1.5	0.075
3	1.5	0.075
4	1.2	0.06
Promedio	1.35	0.067

Figura IV.23: Mediciones de velocidad angular para el experimento 4



Calculo de potencia mecánica a partir de las mediciones realizadas

A partir de las mediciones de cada experimento se puede construir la Tabla IV.13, la cual muestra la potencia mecánica obtenida a partir de cada combustible.

Tabla IV.13: Comparación de resultados de potencia mecánica

Experimento	Torque N m	Velocidad angular rev/s	Velocidad angular rad/s	Potencia mecánica $W_{mecánicas}$
1	0.047	25.33	159.15	7.48
2	0.067	25.18	158.21	10.60
3	0.063	9.33	58.62	3.69
4	0.067	8.60	54.41	3.64

IV.2.2 POTENCIAL ENERGÉTICO DEL BIOGÁS SUMINISTRADO EN LA CALDERA

Con el propósito de conocer la energía química suministrada al generador de vapor, es necesario conocer el volumen de gas o biogás necesario para llevar a generador a su punto de operación. Para lograr tal propósito usó el gasómetro construido mostrado (Figura III.2b), se conectó el

quemador de cobre a la llave de entrada del gasómetro para posteriormente suministrar el mismo flujo de gas durante el tiempo necesario para elevar la presión del generador de vapor hasta 1.5 bar (20 min). En el caso del biogás el procedimiento empleado fue el siguiente: a) Verificar que todas las llaves estén cerradas y los tubos de medición no contengan gas, b) Conectar la entrada del quemador de cobre a la llave de entrada del gasómetro, c) Abrir las llaves de salida, de desacople y de interconexión, d) Una vez que los tubos de medición llegan a su capacidad máxima de medición se cierra la llave de salida, e) Abrir la llave de entrada de gas hasta el punto en que se suministre mismo flujo que en el experimento 4, f) Medir el tiempo en que se quema el volumen de gas contenido en los tubos, g) Calcular el volumen de gas que se quemaría en los 21 minutos requeridos para operación del generador de vapor. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla IV.14.

Tabla IV.14: Volumen de combustible requerido

Combustible	Tiempo de operación s	Volumen m ³
Gas butano	1200	0.0115
Biogás	1260	0.080

Conociendo el volumen de gas requerido se puede calcular la potencia entregada por el combustible:

$$(\text{flujo volumetrico})(\text{densidad})(\text{PCS}) = W_{\text{químicos}}$$

Para gas butano:

$$\left(\frac{0.0115 \text{ m}^3}{1200 \text{ s}}\right) \left(\frac{2.5 \text{ kg}}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{49,608 \text{ kJ}}{\text{kg}}\right) = 1.18 \text{ kW}_{\text{químicos}}$$

Para el biogás:

$$\left(\frac{0.080 \text{ m}^3}{1260 \text{ s}}\right) \left(\frac{0.685 \text{ kg}}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{18262 \text{ kJ}}{\text{kg}_{\text{biogás}}}\right) = 0.79 \text{ kW}_{\text{químicos}}$$

Se debe considerar que el quemado del biogás fue más eficiente, esto tiene como base el hecho que la flama producida es de color azul. Sin embargo, el poder calorífico del biogás y la densidad del mismo son pequeños en comparación con las mismas propiedades del gas butano.

IV.2.3 GENERACIÓN ELÉCTRICA DEL SISTEMA

Se realizaron pruebas conectando diferentes motores a manera de generadores a la máquina de vapor, mediante una banda de caucho rígida de 3.5 cm de diámetro, la distancia entre las flechas es de 4 cm. Se midió voltaje y corriente para cada uno de ellos empleando en toda las pruebas la misma carga. El motor A presento una gran generación de voltaje, pero la máquina de vapor se ve imposibilitada a girarlo a grandes velocidades, lo cual ocasiona valores de corriente muy bajos. Los motores B y D genera un voltaje y una corriente suficientes para cubrir la demanda de

potencia de la carga (Foco), pero al poseer un torque considerable ocasionan el frenado paulatino del eje de la máquina de vapor. El motor C resulto un fracaso al no generar valores de voltaje y corriente no apreciables por el multímetro usado. Por otra parte los motores E y F generan un voltaje y corriente comparativamente bajos, sin embargo, el tiempo de operación de la máquina con estos motores es mayor. El resumen de las pruebas se muestra en la Tabla IV.15.

Tabla IV.15: Resultados de las pruebas de generación eléctrica.

Motor	Voltaje V	Corriente A	Potencia generada W	Tiempo de operación s	Energía generada Ws
A	95.45	0.13×10^{-3}	12.40×10^{-3}	30	0.37
B	19	0.17	3.23	120	387.60
C	0	0.00	0.00	0	0.00
D	12	0.13	1.56	90	140.40
E	2.3	0.10	0.23	240	55.20
F	1.02	0.07	0.07	230	16.42

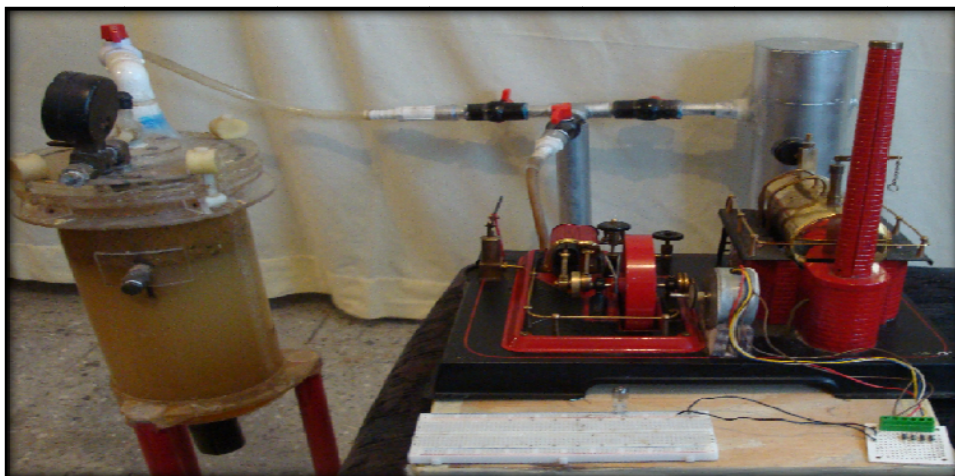
Con base a los resultados obtenidos se eligió el motor B, ya que presenta los mejores parámetros para generación.

IV.3 RESULTADOS GLOBALES DEL PROTOTIPO

IV.3.1 PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA COMPLETO (REACTOR ANAEROBIO-MÁQUINA DE VAPOR-GENERADOR ELÉCTRICO)

La Figura IV.24 muestra el sistema completo puesto en operación. El biogás necesario para operar la máquina de vapor fue 80 litros suministrados a lo largo de 21 minutos, lográndose un flujo másico de 43.49×10^{-6} kg/s. La potencia química, proporcionada a 0.280 litros de agua dentro del generador de vapor, por el combustible para alcanzar la presión de 1.5bar es de 0.79 kW_q . El flujo de vapor generado a través del mecanismo pistón-biela-manivela genero una potencia mecánica de 3.64 W_m . Por su parte el generador acoplado entregó 3.23 W_e .

Figura IV.24: Totalidad del sistema de generación eléctrica.



IV.3.2 EFICIENCIAS OBTENIDAS

Considerando que el quemador de biogás tiene un diseño no profesional éste presenta una eficiencia de combustión cerca 65%, tomando en cuenta que la potencia química proporcionada por el combustible es de 0.79 kW por lo tanto la potencia suministrada al generador de vapor es de 0.513 kW, además se debe incluir las pérdidas por disipación de calor y el área efectiva de transferencia de calor las cuales se consideran en un valor cercano a 20%. Entonces se tiene una potencia suministrada de 0.410 kW.

Conociendo que la potencia mecánica a la salida de la flecha de la máquina de vapor es de 3.64 W, se puede calcular la eficiencia de ésta parte del sistema (generación de vapor y mecanismo pistón-biela-manivela):

$$\eta = \frac{3.64 \text{ W}}{419 \text{ W}} \times 100 = 0.88\%$$

Como puede notarse la eficiencia de ésta parte del sistema es sumamente baja, debido a las pérdidas por fricción en el pistón, corredera y volante de inercia al igual que las pérdidas térmicas asociadas al mal aislamiento térmico.

Lo que respecta al apartado de generación eléctrica se tiene una eficiencia de 69% sin considerar las pérdidas en la banda ni las pérdidas por fricción y resistencia de los conductores en bobinas

$$\eta_{\text{eléctrica}} = \frac{3.23}{3.64} \times 100 = 88.7\%$$

Esta página se dejó en blanco intencionalmente