
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

III.1 MODELO EXPERIMENTAL

El modelo experimental elegido para la estimación del potencial de producción de biogás fue un estudio a escala laboratorio empleando un reactor tipo batch (debido a su sencillez de implementación). Para llevar a cabo el modelo elegido se seguirá el siguiente tren de procesos unitarios:

1. Tratamiento anaerobio de los desechos
2. Utilización del biogás en una máquina de vapor
3. Acoplamiento a la máquina de vapor de un generador
4. Pruebas de generación eléctrica

Se introducirá al reactor anaerobio una relación microorganismos/residuos sólidos orgánicos urbanos a fin de agilizar la degradación de la biomasa. Se seleccionará el tiempo de degradación óptimo para maximizar la producción de biogás diaria y minimizar el volumen de reactor requerido. Asimismo se estimará la capacidad de producción de biogás diaria específica por unidad de volumen de reactor. Empleando los datos de producción diaria específica se realizarán cálculos de diseño para posible escalamiento del sistema.

Una vez obtenido el potencial de generación de biogás se diseñará un sistema de conversión de la energía química en energía eléctrica empleando la máquina de vapor Wilesco para hacer una demostración. Al generador se acoplará una carga resistiva luminosa basada en su potencial de generación eléctrica.

Los objetivos del estudio mencionado son:

- a) La determinación de la producción de biogás diaria específica por unidad de volumen de reactor para el substrato empleado bajo ciertas condiciones de temperatura.
- b) La determinación del tiempo de residencia hidráulica (TRH).
- c) Corroborar la influencia de parámetros físicos sobre el sistema anaerobio.
- d) Producir energía eléctrica mediante un dispositivo de demostración (máquina de vapor)
- e) Determinar el potencial de producción eléctrica para la producción de biogás calculado en el inciso

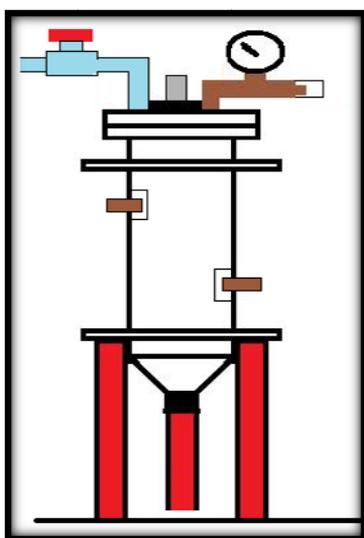
III.2 REACTOR ANAEROBIO

Se diseñó una planta piloto de biogás empleando un reactor de acrílico, originalmente destinado para experimentación de laboratorio. El reactor tiene un volumen de 4.5 L y 0.7 m de altura. La transparencia del reactor permite una apreciación de las diferentes etapas que transcurren en el substrato en degradación.

El reactor tiene una tapa de acrílico en forma de registro que se sujeta al cuerpo del reactor mediante cuatro tornillos de plástico ajustables. La tapa originalmente poseía un orificio central superior y dos salidas con llave de cobre, una con un manómetro de alcance a 1kg/cm^2 y otra con

un codo de cobre unido a una llave de paso. Debido al mal estado de estas salidas se optó por remplazar la de la llave de paso por nuevos componentes de PVC y sellar la del manómetro debido a defectos del mismo y a la resistencia estimada del acrílico (el cual podría no resistir la remoción forzada del tubo). Además se añadió un empaque de caucho a la tapa a fin de garantizar un sellado hermético y se utilizó el orificio superior como fuente de acceso al reactor para realizar las mediciones de pH y temperatura. El cuerpo del reactor cuenta con tres accesos, dos laterales de tubo de cobre para drenado parcial y uno en la parte inferior del reactor acoplado a un tubo de PVC para extracción de lodos que también pueden usarse como tomas de muestra. La Figura III.1a muestra un esquema del reactor y la Figura III.1b el reactor real (con carga).

Figura III.1a: Esquema del reactor empleado Figura III.1b: Reactor real



III. 3 GASÓMETRO (MEDIDOR DE GAS)

Existen dos alternativas para la construcción de un gasómetro de bajo presupuesto: a) La campana flotante y b) Modelos de desplazamiento de agua (campana de agua y vasos comunicantes).

El presente trabajo emplea el modelo de desplazamiento de agua (Menna y col., 2007) en vasos comunicantes. El diseño del gasómetro consta de dos tubos de PVC sanitario de 0.10m de diámetro y 0.004m de espesor. Ambos tubos se colocaron verticalmente, uno de ellos de 0.66m de altura y cerrado en ambos extremos y el otro de 1.30m de altura, abierto a la atmósfera, con volúmenes aproximados de 5.18 y 10.21 litros respectivamente. Con el fin de visualizar el desnivel de agua provocado por la presión ejercida por el biogás se adaptó a cada tubo una manguera transparente de PVC cristal y dos cintas métricas para la observación y medición de dicho desnivel.

Ambos tubos se comunican en la parte inferior para cumplir con el esquema de vasos comunicantes, conformando a su vez un barómetro de tubo abierto, logrando además de medir el volumen de gas producido por el reactor una medición constante de la presión interna del reactor. Las Figuras III.2a y III.2b muestran el dispositivo antes descrito.

Figura III.2a. Esquema de gasómetro

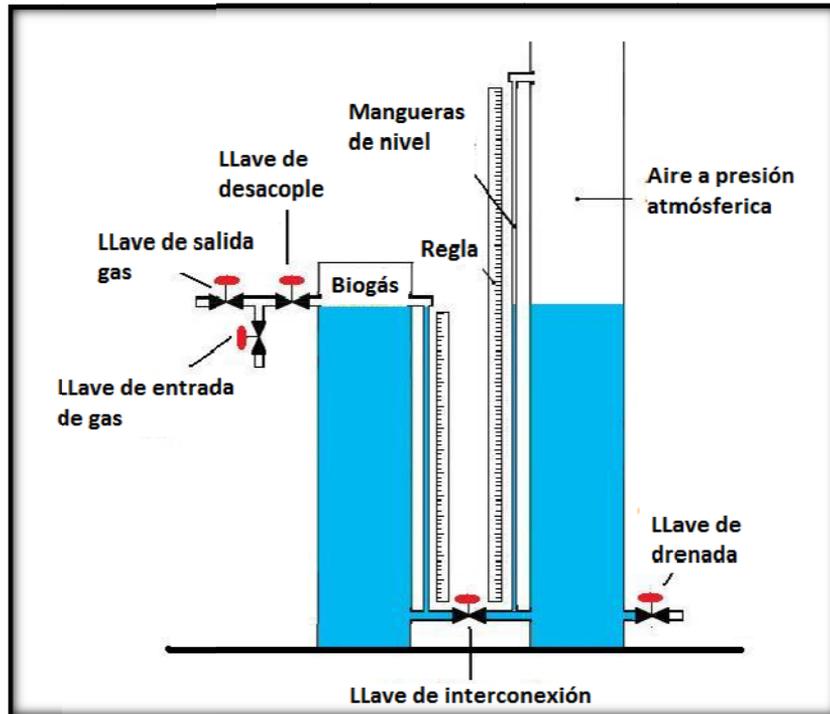


Figura III.2b Gasómetro construido



El tubo de 0.66m posee en su parte superior una entrada/salida de gas en "T", permitiendo el ingreso del biogás producido por el reactor y la salida de éste para su almacenamiento y empleo. La interconexión entre los tubos se realiza en la parte inferior mediante un tubo de PVC de ½" con una llave de "bola" intercalada para permitir o inhibir el flujo de agua entre ellos. El tubo de 1.30m,

dispone de una llave de drenaje para la extracción del agua, necesaria en la operación de calibración y ajuste de nivelación durante la etapa de medición de biogás.

Ambos recipientes contienen agua acidulada con 5% de ácido clorhídrico, a fin de evitar la disolución del CO_2 contenido en biogás y con ello la tergiversación de las mediciones de volumen y composición (Yank L. y col., 2002). Esto condiciona la selección del material de los tubos a PVC.

III.4 MEDIDOR DE CO_2

Debido a la composición variable del biogás es necesario realizar mediciones de sus componentes a fin de tener una mejor aproximación de su potencial energético. La forma más precisa de conocer la composición del biogás es el empleo de un espectrofotómetro de masas. Sin embargo, uno de los objetivos primordiales del presente trabajo es la difusión de métodos de fácil acceso y bajo costo. Es por esto que la forma de conocer la composición del biogás se realizó midiendo uno de sus componentes fundamentales, en este caso del CO_2 por ser el gas indeseable de mayor volumen.

Para ésto, se tomó una muestra en el periodo de producción estable haciéndola circular a través de un recipiente con una solución de agua y NaOH al 15%. Tras once horas en contacto con la mezcla el CO_2 reacciona con la sosa precipitando Na_2CO_3 y el biogás pierde volumen, volumen que permite conocer la composición volumétrica de CO_2 .

III. 5 ALMACENAMIENTO DE BIOGÁS

El almacén de biogás que se empleó es un tambo de plástico 200 litros de capacidad, el cual fue acondicionado con dos perforaciones, una en la parte superior a fin de servir como entrada del biogás a almacenar y una en su parte inferior que sirve como desagüe del agua contenida en él durante el proceso de extracción de aire descrito a continuación.

Debido a que el recipiente en bruto contiene dentro de sí cierta cantidad de aire, es necesario extraer éste a fin de tener la totalidad de su volumen disponible para el almacenamiento del biogás. Como se ha mencionado anteriormente el biogás es tan solo un poco más ligero que el aire, lo cual dificulta una separación llevada a cabo por diferencia de densidades, lo cual hace necesario optar por una alternativa más sencilla. En este estudio se tomó la decisión de “empujar fuera” el aire contenido en el recipiente mediante la inyección de un fluido de fácil extracción posterior. El proceso consistió en llenar el recipiente totalmente con agua, misma que sería extraída poco a poco en un volumen igual al del biogás a ingresar.

III.6 SUBSTRATO A DIGERIR E INÓCULO EMPLEADO

El substrato con el cual se trabajó fue en una muestra aleatoria de la fracción orgánica de RSU procedente de tres hogares del Distrito Federal. Como primer inóculo se usó una muestra del inóculo usan en la cervecería Cuauhtémoc Moctezuma. En la cervecería se tiene un reactor anaerobio para el tratamiento de sus aguas residuales. El inóculo tiene características granulares y

una alta actividad metanógena. Como segundo inóculo se empleó una porción del lodo digerido obtenido durante la puesta en marcha del reactor.

Mediante un estudio de sólidos volátiles realizado en el laboratorio de Ing. Ambiental de la UNAM del Posgrado de Ingeniería de CU, Tabla III.1, se determinó la composición de la muestra (Tabla III.2) mediante las ecuaciones III.1 a III.2:

Tabla III.1: Estudio de laboratorio para determinar Sólidos totales, volátiles y fijos.

Peso de la capsula (g)	Peso de la cap. y muestra (g)	Peso de la muestra (g)	Peso de la muestra tras 1h a 105°C	Peso de la muestra tras 1h 550°C (g)
53.4238	60.8666	7.4428	55.5826	53.5362

El estudio de laboratorio consiste en la técnica de laboratorio de APHA (1992). Donde se coloca la muestra y se seca a 110°C para evaporar el contenido de agua y determinar los sólidos totales de la muestra. Cuando se somete la misma muestra a 550°C se volatilizan los compuestos orgánicos, correspondientes a los sólidos volátiles y quedando los sólidos fijos en las cenizas, los sólidos fijos corresponden a los compuestos inorgánicos en la muestra.

$$\text{Sólidos totales} = \frac{(\text{peso despues de 1h a } 105^{\circ}\text{C} - \text{peso capsula})(100)}{\text{peso de la muestra}} \quad (\text{III-1})$$

$$\text{Sólidos totales fijos} = \frac{(\text{peso despues de 1h a } 505^{\circ}\text{C} - \text{peso capsula})(100)}{\text{peso de la muestra}} \quad (\text{III-2})$$

$$\text{Sólidos totales} = \text{Sólidos totales fijos} + \text{sólidos totales volátiles} \quad (\text{III-3})$$

Tabla III.2: Composición del sustrato a digerir

Parámetro	%
Sólidos Totales (ST)	29.00
Sólidos Totales Fijos (STF)	1.51
Sólidos Totales Volátiles (STV)	27.50
Humedad	71.00

III. 7 OPERACIÓN DEL REACTOR ANAEROBIO

III.7.1 AGITACIÓN

La agitación se llevó a cabo de forma manual cada tres días describiendo circunferencias en el aire 30 segundos en dirección de las manecillas del reloj y 30 segundos en contra de estas.

III.7.2 TEMPERATURA

No se empleó ningún tipo de calentador artificial. La temperatura estaba determinada por la temperatura al interior de un cuarto sin sistemas de acondicionamiento cuya temperatura estaba a su vez relacionada con la temperatura exterior durante los meses de enero y febrero.

Se eligió realizar el estudio en la temporada invernal ya que es en ésta cuando se registran las temperaturas regionales más bajas, lo que determina el peor escenario (el TRH más prolongado y la mínima producción de gas al día).

III.7.3 MEDICIÓN DE PH

La medición de pH y temperatura se realizaron diariamente a través del orificio central de la tapa del reactor mismo que permanecía sellado mediante un tapón de plástico cuando no estaba en uso. Para la medición de pH se emplearon tiras reactivas, mientras que para la temperatura se empleó un termómetro de laboratorio.

III.7.4 MEDICIÓN DE GAS

El primer paso para emplear el medidor de vasos comunicantes es llenar el tubo pequeño a través del tubo grande (“llave de interconexión” abierta) hasta alcanzar la altura justo debajo del tubo de la llave de desacople (0.55 cm) verificándolo mediante la manguera de nivel. Debido a la configuración de vasos comunicantes ambos tubos tendrán la misma altura de agua dentro de ellos.

El biogás generado en el reactor ingresa por la “llave de entrada de gas”, “llave de salida de gas” cerrada, de forma que el volumen obtenido genera presión que desplaza agua del tubo cerrado a la atmósfera al tubo abierto a ésta. Lo anterior produce una diferencia de altura “h” proporcional a la diferencia entre la presión generada por el gas y la presión atmosférica sobre la columna de agua en el tubo abierto a la atmósfera.

El volumen de biogás ingresado en el tubo cerrado a la atmósfera desplaza un volumen de agua ocasionando una disminución en la altura de la columna de agua. El volumen desplazado ingresa al tubo abierto a la atmósfera, incrementando la altura de la columna de agua en éste en la misma medida. Como conclusión el desnivel “h” es el doble de la altura del biogás ingresado.

Considerando que el diámetro de los tubos de PVC es 0.10cm, el volumen del biogás ingresado puede calcularse con base a la mitad del desnivel medido (h/2) y la superficie transversal del tubo:

$$\text{Volumen de biogás ingresado} = \frac{\text{diámetro}^2}{4} \left(\frac{h}{2}\right) \quad (\text{III-4})$$

Se debe recordar que el biogás dentro del tubo cerrado no está a presión atmosférica sino a la presión ejercida por la columna de agua del desnivel generado. Lo cual implica que se debe realizar ciertas correcciones a fin de evitar errores de medición.

Existen dos caminos posibles para la correcta medición del volumen de biogás ingresado. El primero implica considerar el comportamiento ideal del gas.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (\text{III-5})$$

Donde:

P_1 = presión de la columna de agua = $\rho_{\text{agua}}gh$

V_1 = volumen a presión de la columna de agua

$T_1 = T_2$ = temperatura

P_2 = presión atmosférica

V_2 = volumen a presión atmosférica

El segundo camino se realiza a través del siguiente proceso. El primer paso es cerrar la “llave de interconexión” y “llave de entrada de gas”. Una vez hecho lo anterior se abre la “llave de drenado” permitiendo la salida de agua hasta que el nivel de ésta iguale el nivel de agua dentro del tubo cerrado a la atmósfera. El siguiente paso es abrir la “llave de interconexión” lo cual ocasiona un nuevo desnivel, por expansión de volumen del biogás, entre las columnas de agua. El ciclo de nivelación: Cierre de la “llave de interconexión” y apertura de la “llave de drenado” hasta igualar la altura de las columnas de agua en ambos tubos se repite hasta que al abrir la “llave de interconexión” no se produzca un desnivel entre las columnas. Cuando no se produzca un desnivel entre las columnas se asume que el biogás dentro del tubo cerrado se encuentra a presión atmosférica.

III.7. 5 CARGA DEL REACTOR

El reactor fue cargado dos veces en base a distintas mezclas de agua y substrato, procurando inoculaciones cercanas al 30%, las cuales se detallan en la Tabla III.3

Tabla III.3: Detalles de las mezclas de carga para el reactor

Mezcla	Substrato L	Substrato kg	Inóculo L	Inóculo kg	kg substrato/kg inóculo	L substrato/L inóculo	Relación agua: substrato	%ST*
A	1.063	1.500	0.438	0.450	3.333	2.426	2:1	10
B	1.343	1.900	0.471	0.570	3.333	2.851	1.5:1	11
C	2.250	3.172	0.750	0.915	3.466	3	1:2	18

Nota: densidad del substrato 1.41 kg/L; densidad del inóculo de cervecera; densidad del inóculo reciclado 1.21 [kg/l]; %ST_p = sólidos totales en peso de la mezcla. Relación agua: substrato 2:1

III.8 MINI-PLANTA DE VAPOR

III.8.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MÁQUINA DE VAPOR

Para fines demostrativos se empleó una máquina de vapor de la marca Wileco modelo D21 (Figura III.3a). Los componentes (Figura III.3b) principales de la máquina son: Una caldera de latón de 65 mm de diámetro y 165 mm de largo, con una capacidad de 500 ml, válvula de seguridad, regulador de vapor, bomba, gobernador centrífugo, un manómetro de alcance de 2 bar. La máquina tiene un quemador especialmente diseñado para el uso de pellets diseñados por la empresa manufacturera, éste fue remplazado por un quemador cilíndrico con un diámetro de ½” y

140 mm de largo, a fin de poder emplear gas. El mecanismo de conversión de energía química a mecánica está constituido por un sistema cilindro pistón biela-manivela.

Figura III.3a: Máquina de vapor WileSCO D21

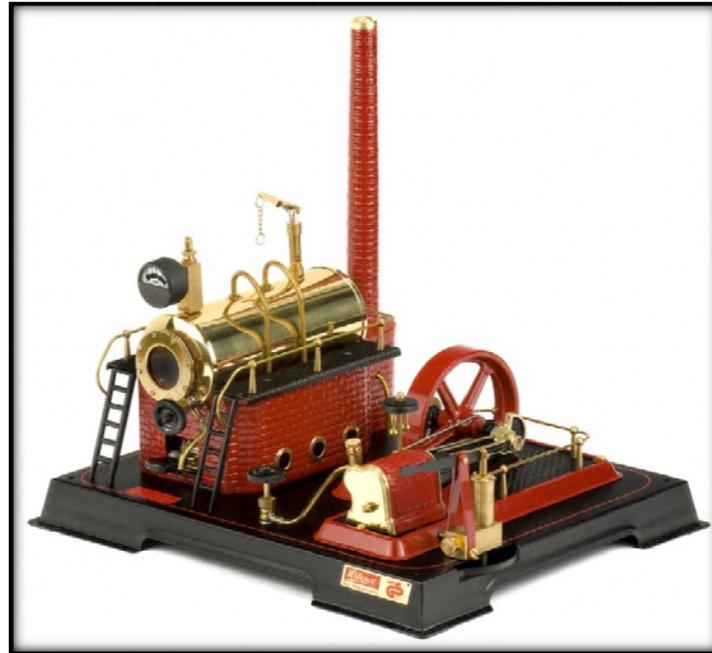
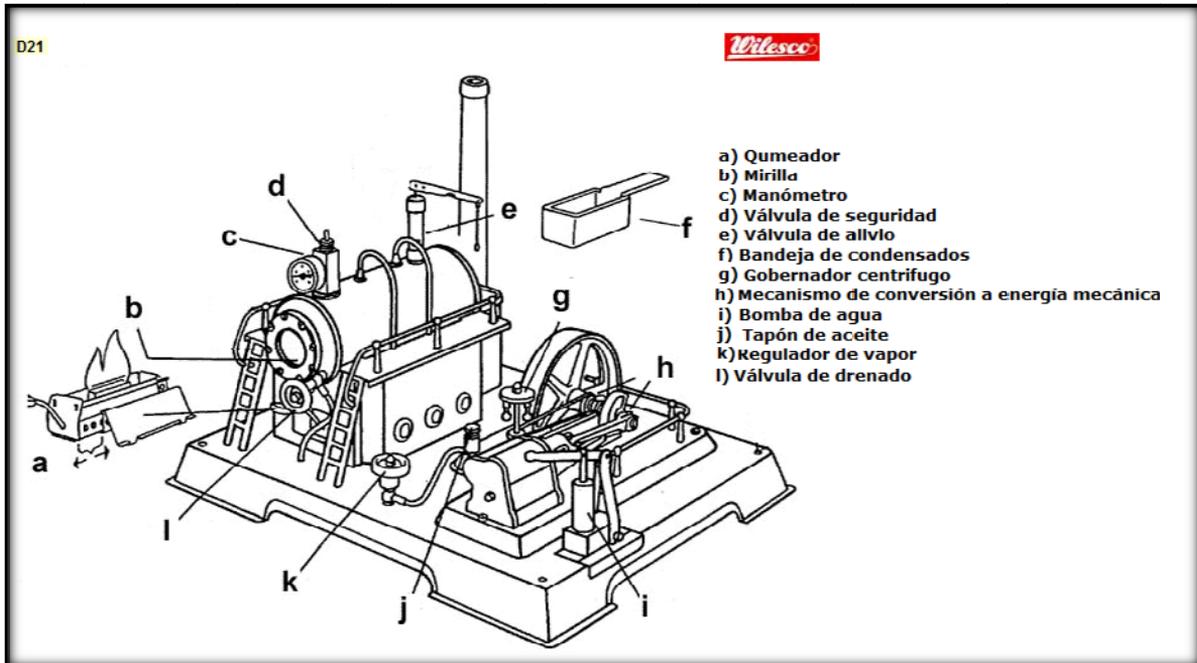


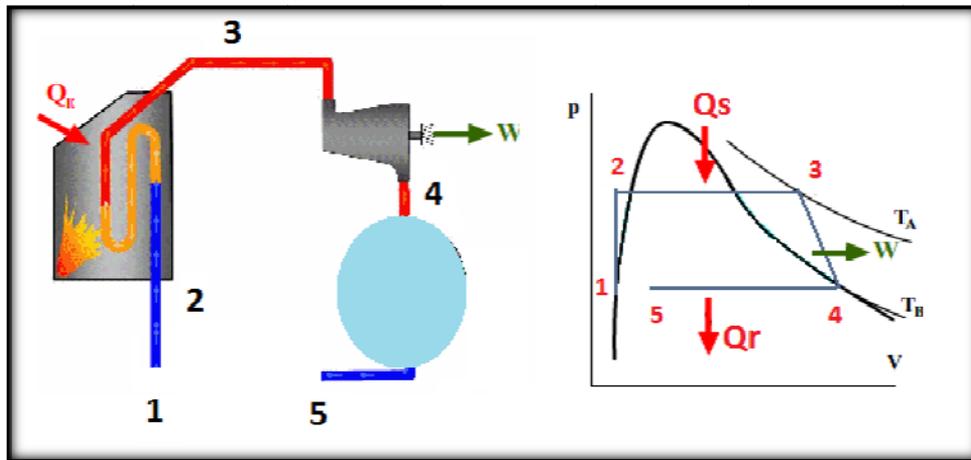
Figura III.3b: Componentes de la maquina WileSCO D21



Los procesos termodinámico empleados para la conversión de energía térmica a mecánica es un ciclo rankine abierto. El ciclo en detalle es el siguiente (Figura III.4):

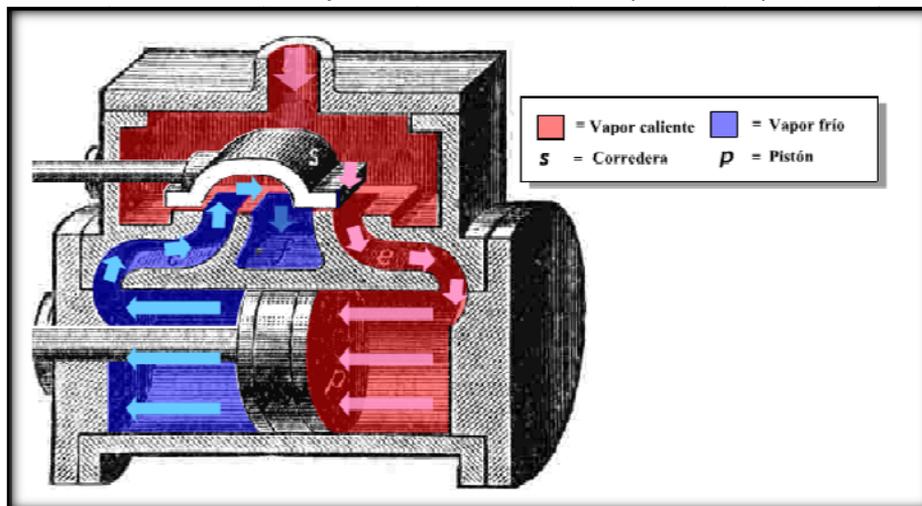
- A) El **proceso 1-2** consiste en suministrar agua a la caldera, en este caso se hace de forma manual.
- B) El **proceso 2-3** es una transmisión de calor hacia el fluido de trabajo a presión constante en la caldera (1.5 bar). Con este calor se evapora todo el líquido y se calienta el vapor hasta la temperatura máxima (111.4 °C)
- C) El **proceso 3-4**: es una expansión. El vapor realiza trabajo en la máquina de vapor desde la presión de la caldera hasta un valor bajo de presión al cual se transfiere el vapor al condensador.
- D) El **proceso 4-5** el líquido condensado se almacena en la bandeja de condensados.

Figura III.4: Diagrama de procesos termodinámicos (González, 2002)



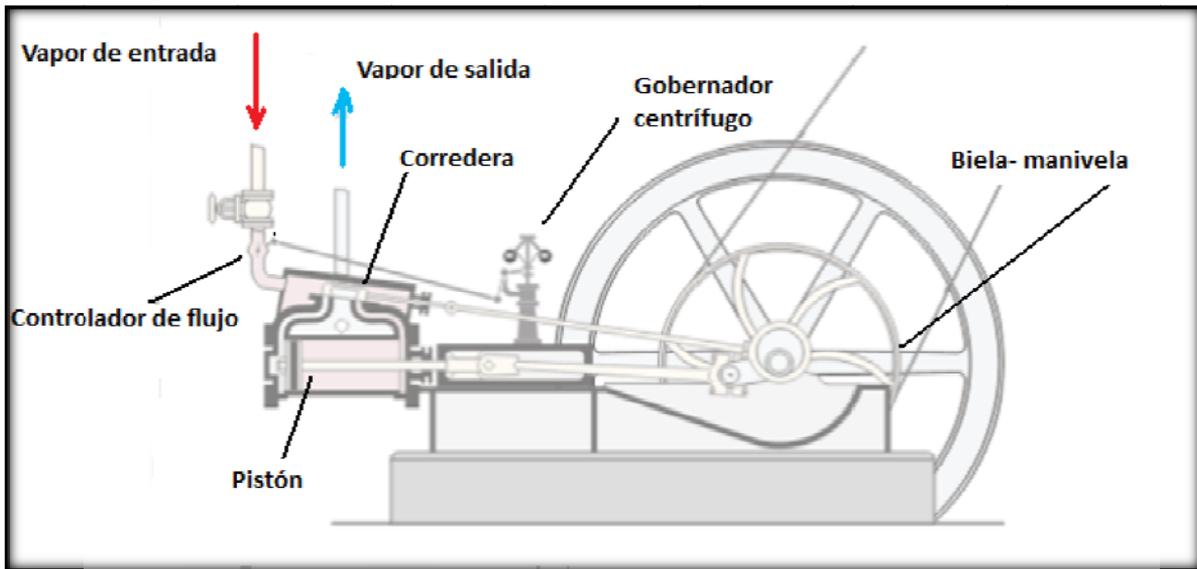
Para realizar el trabajo la máquina de vapor utiliza un cilindro de doble efecto con un sistema provisto de una pieza desplazable llamada **corredera** cuya misión es enviar el vapor a un lado u otro del pistón. El vapor caliente que entra de la caldera empuja al pistón que realiza un trabajo. El movimiento del pistón también provoca que la corredera se desplace en la dirección opuesta y abre el paso de vapor a un u otro lado del émbolo. El vapor utilizado es expulsado a la salida de gases a través del camino abierto por la misma corredera (Figura III.5).

Figura III.5: Mecanismo de trabajo de traslación de la máquina de vapor (González, 2002)



Una vez que se tiene un movimiento de traslación es necesaria una conversión de éste a un movimiento rotatorio que se aprovecha por el generador eléctrico. Ésta conversión se lleva a cabo por medio de un mecanismo biela-manivela con la ayuda de un gobernador centrífugo el cual controla el flujo de vapor para mantener una velocidad angular constante (Figura III.6).

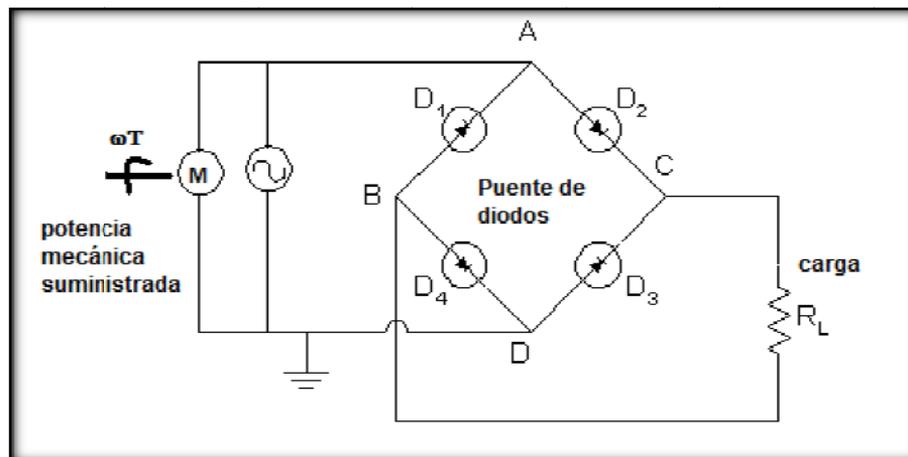
Figura III.6: Conversión de movimiento traslatorio a rotatorio (González, 2002)



III.8.2 SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

Debido a las limitaciones para construir un generador adecuado a las características de la potencia mecánica suministrada por la máquina de vapor. Se tuvo la necesidad de emplear motores comerciales aprovechados a manera de generador. Para transformar la energía mecánica producida por la mini planta de vapor se acoplaron mediante una banda diversos motores a manera de generador asíncrono monofásico primario a fin de realizar una comparación de la potencia eléctrica. La configuración empleada se muestra en la Figura III.7, los motores fueron dotados de un puente de diodos para obtener corriente directa.

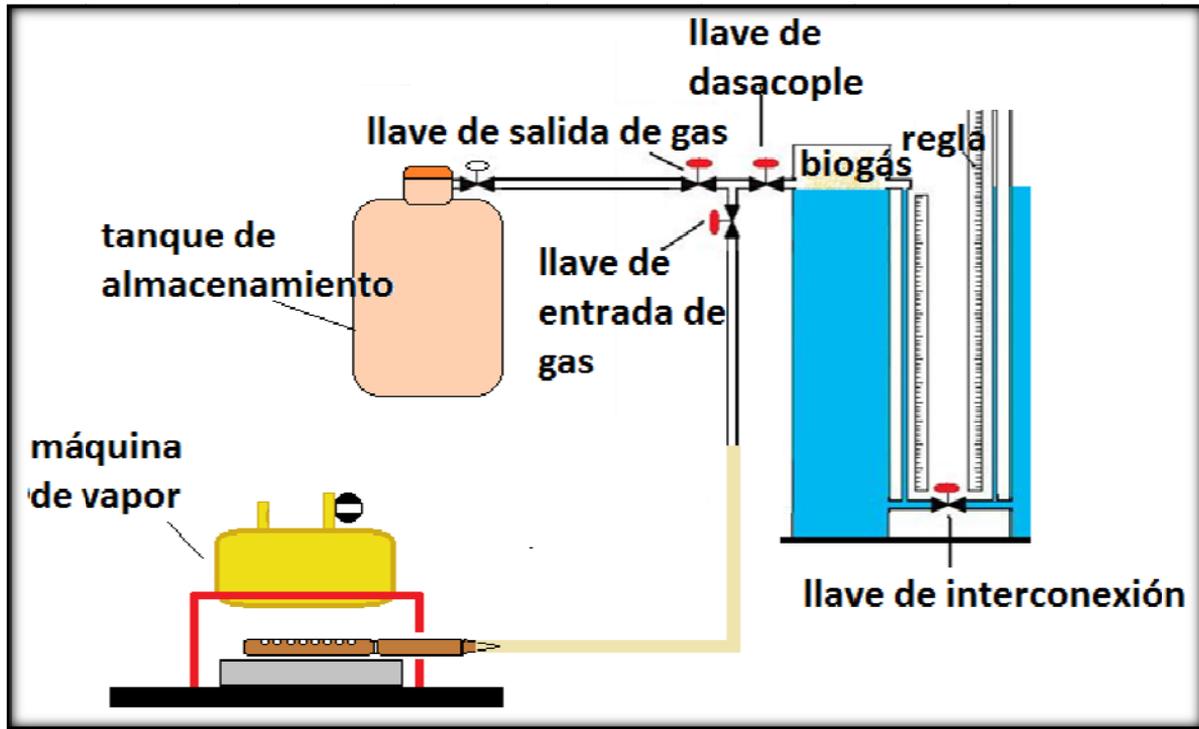
Figura III.7: Generador eléctrico (Autores)



III.9 ACOPLAMIENTO DEL REACTOR A LA MINI-PLANTA DE GENERACIÓN

El tanque de almacenamiento de biogás se conectó al quemador mediante la llave T del gasómetro, retirando la conexión de éste último al reactor. La conexión se llevó a cabo usando una manguera de caucho conectada al quemador cilíndrico diseñado (Figura III.8).

Figura III.8: Acoplamiento del reactor a la mini-planta de vapor



Esta página se dejó en blanco intencionalmente