

## CAPITULO III

### 3. Reactores Químicos

Los reactores son equipos en donde se lleva a cabo una reacción química. Los reactores son de diferente forma y de diferentes materiales de construcción, el diseño final obedece a las propiedades físico – química de los componentes del sistema reaccionante, de la forma de alimentación de los reactantes y de la salida de los productos, del sistema de agitación, transferencia de calor y hasta de la naturaleza corrosiva de los materiales químicos, etc.(31)

#### 3.1 Biodigestores

Un biodigestor es un sistema de tratamiento primario anaerobio que consiste en tener por un determinado período de tiempo los desechos orgánicos en un tanque cerrado para que se efectúe la fermentación del material, produciéndose de esta manera gas natural y un efluente de fácil disposición en el entorno. Se puede construir de metal, cemento o plástico y debe estar herméticamente cerrado.(38)

Para las diversas configuraciones de biodigestores existen distintos usos tanto para residuos urbanos, industriales como agrícolas. Para los residuos agrícolas se emplea normalmente un proceso discontinuo o por lotes mientras que en la industria la tendencia gira a biodigestores con lechos fluidizados o fijos. La mayoría de los residuos tratados por los digestores son líquidos con un contenido en sólidos entre el 2 y el 6 por 100.

Para escoger el biodigestor óptimo, se debe entender la cinética de eliminación de sustrato por los diferentes tipos de microbios así como las propiedades fundamentales de los diferentes tipos de biodigestores.

Los factores que influyen en la elección entre los diferentes tipos de biodigestores pueden incluir: las características físicas y químicas del residuo considerado la concentración de contaminantes, la presencia o ausencia de oxígeno, la eficiencia del tratamiento y fiabilidad del sistema requerido, las condiciones climáticas bajo las cuáles va a operar el biodigestor, el número de procesos biológicos.

### 3.2 Tipos de Reactores.

Existen una gran variedad de reactores que se utilizan en aplicaciones de medio ambiente y son:

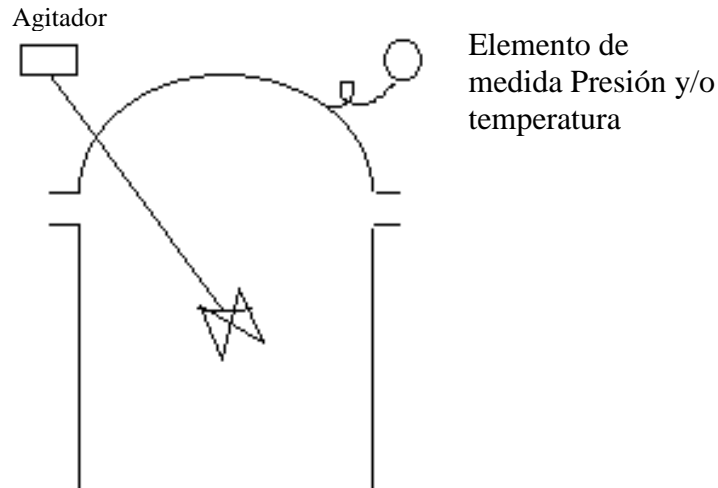
**TABLA 3. Tipos de reactores y usos característicos. (31)**

	<b>Tipo de Reactor</b>	<b>Usos característicos</b>
<b>Reactores básicos</b>	Discontinuo	Test BOD, alto rendimiento en la eliminación de componentes individuales de aguas residuales.
	Tanque agitado de flujo continuo (CSTR)	Digestión anaerobia de lodos y aguas concentradas, balsas aireadas para tratamiento de residuos industriales, estabilización de estanques para aguas residuales industriales y municipales, parte de tratamiento de lodo activo de aguas residuales industriales y municipales.
	Flujo de pistón	Tratamiento de lodo activado de aguas residuales industriales y municipales, tratamiento de balsas aireadas de residuos industriales, estabilización de estanques para residuos industriales y municipales, nitrificación, eliminación altamente eficaz de componentes individuales de aguas residuales.
<b>Reactores de película fija</b>	Lecho relleno	Tratamiento aerobio y anaerobio de aguas residuales industriales y municipales, eliminación de materia orgánica, nitrificación, desnitrificación.
	Lecho fluidizado	Tratamiento aerobio de aguas residuales de baja concentración de BOD, biodegradación de productos orgánicos tóxicos, tratamiento anaerobio, desnitrificación
	Contactador biológico rotativo (RBC)	Tratamiento aerobio y anaerobio de aguas residuales industriales y municipales, eliminación de productos orgánicos, nitrificación.
<b>Disposición de reactores</b>	Reciclo	Tratamiento aerobio y anaerobio de aguas residuales industriales y municipales, especialmente de baja concentración de BOD, eliminación de productos orgánicos, nitrificación, desnitrificación.
	En serie	Eliminación de BOD combinada con nitrificación o con nitrificación y desnitrificación o combinada con eliminación biológica de fósforo, tratamiento anaerobio en etapas, tratamiento anaeróbico y secuencial de aguas residuales tales como la eliminación de productos químicos orgánicos tóxicos específicos.
	En paralelo	Utilizados generalmente para redundancia y fiabilidad en el funcionamiento de plantas, especialmente con elevados flujos en conjunto de aguas residuales.
	Híbrido	Utilizados en formas combinadas de tratamiento tales como eliminación de productos orgánicos y nitrificación, o eliminación de productos orgánicos, nitrógeno y fósforo; tratamiento anaerobio de aguas residuales.
	Discontinuo secuencial	Muy útiles por su gran rendimiento en la eliminación de componentes como productos orgánicos biodegradables pero peligrosos, combinado con eliminación de productos orgánicos, nitrógeno y fósforo; combinación de procesos aerobios y anaerobios con los mismos microorganismos.

De la tabla 3 se aprecia que existen una gran variedad de reactores, para diferentes propósitos, en esta investigación se utiliza el reactor tipo Batch, por la facilidad en su operación y control de la bioreacción.

### 3.2.1 Ecuaciones de Diseño de los Reactores Ideales

#### 3.2.1.1 Reactor Batch o Discontinuo



**GRAFICO 1. Representación esquemática de un reactor Batch o por cargas. (32)**

El reactor Batch, constituye un reactor ideal. Los reactantes que se introducen en el reactor, se mezclan perfectamente, se deja que los materiales reaccionen un tiempo determinado, y finalmente se descarga la mezcla resultante.

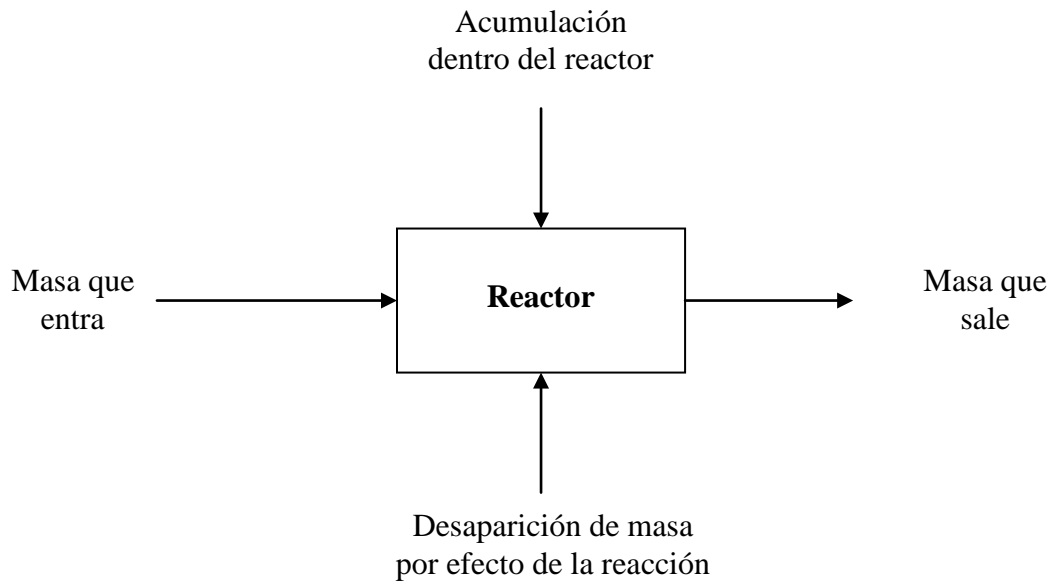
Esta es una operación no estacionaria en la que la composición va variando con el tiempo, aunque en cada instante es uniforme en todos los puntos del reactor.(26)

El tiempo total del reactor Batch se lo determina de la siguiente manera:

- Tiempo de carga o alimentación del reactor con los reactantes **tc**.
- Tiempo de duración de la reacción **Tr**.
- Tiempo de descarga de productos de la reacción **Td**.
- Tiempo de limpieza del reactor **tl**

La suma de estos 4 tiempos constituyen en tiempo de un Batch.

Para el diseño de este reactor es necesario plantear balance de materiales, considerando a todo el reactor como el sistema.



La ecuación general de balance de masa referido al componente A del sistema, establece que:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Masa que} \\ \text{entra al} \\ \text{reactor} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Masa que} \\ \text{sale del} \\ \text{reactor} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Acumulación de} \\ \text{masa dentro del} \\ \text{reactor} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Hasta que desaparece} \\ \text{dentro del reactor por} \\ \text{efecto de la reacción} \end{array} \right) \quad (7)$$

Para un reactor Batch las corrientes de entrada y salida son cero, por lo tanto:

$$0 = \left( \begin{array}{c} \text{Acumulación} \\ \text{de masa dentro} \\ \text{del reactor:} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Masa que desaparece} \\ \text{por efecto dentro del} \\ \text{reactor} \end{array} \right) \quad (8)$$

$$\left( \begin{array}{c} \text{Masa que} \\ \text{desaparece por} \\ \text{Efecto de la} \\ \text{reacción} \end{array} \right) = (-r_A) V = \left( \begin{array}{c} \text{Moles} \\ \text{Volumen * tiempo} \end{array} \right) \text{ Volumen} \quad (9)$$

$$\left( \begin{array}{c} \text{Acumulación} \\ \text{de masa dentro} \\ \text{del reactor} \end{array} \right) = \frac{dN_A}{dt} = \frac{\text{Moles}}{\text{Tiempo}} \quad (10)$$

Introduciendo estas ecuaciones en el balance de masa del reactor Batch, tenemos:

$$0 = \frac{dN_A}{dt} + (-r_A) V \quad (11)$$

Si la masa acumulada dentro del reactor = masa que desaparece por efecto de la reacción, entonces;

$$-\frac{dN_A}{dt} = (-r_A) V \quad (12)$$

El número de moles a un tiempo t cualquiera esta dado por:

$$N_A = N_{A0}(1 - X_A)$$

En donde;  $X_A$  = conversión fraccional o simplemente conversión tomando la diferencial.

$$dN_A = -N_{A0} \frac{dX_A}{dt}$$

$$(-r_A)V = N_{A0} \frac{dX_A}{dt} \quad (13)$$

Separando variables e integrando

$$t = N_{A0} \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{(-r_A) V}$$

Si el volumen permanece constante, entonces:

$$t = \frac{N_{A0}}{V} \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{(-r_A)}$$

Ecuación General de diseño para un Reactor Batch

Por definición

$$C_{A0} = \frac{N_A}{V} \quad (14)$$

A volumen constante, por tanto:

$$C_{A0} = \frac{N_{A0}}{V}$$

Sustituyendo:

$$t = C_{A0} \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{(-r_A)} \quad (15)$$

Donde:

$(-r_A)$  = Velocidad de reacción.

$V$  = Volumen del reactor.

$N_A$  = Moles del componente A, a un tiempo t cualquiera.

$N_{A0}$  = Moles iniciales del componente A en el sistema reaccionante.

$t$  = tiempo para alcanzar la conversión  $X_A$ .

$X_A$  = Fracción del reactante A

$C_{A0}$  = Concentración inicial del reactante A.

### 3.2.1.2 Reactor ideal continuo de tanque agitado CFSTR (constant flow stirred tank reactor).

Es un reactor ideal de flujo estacionario, en el cual el contenido está perfectamente agitado y su composición en cada instante es la misma en todos los puntos del reactor.

Por lo que la corriente de salida de este reactor tiene la misma composición que la del fluido contenido en el mismo.

A este flujo se le denomina flujo de mezcla completa, y al reactor correspondiente reactor de flujo de mezcla completa.

Tiene un flujo continuo de entrada y salida, el CFSTR opera en un régimen estacionario, esto es en la acumulación de materia es cero.

La característica básica del CFSTR ideal es que las concentraciones del sustrato y microorganismos son las mismas en todo el reactor.

“Trabaja normalmente con altas conversiones de sustrato por lo que la concentración del sustrato en la corriente efluente es bastante baja”.(21)

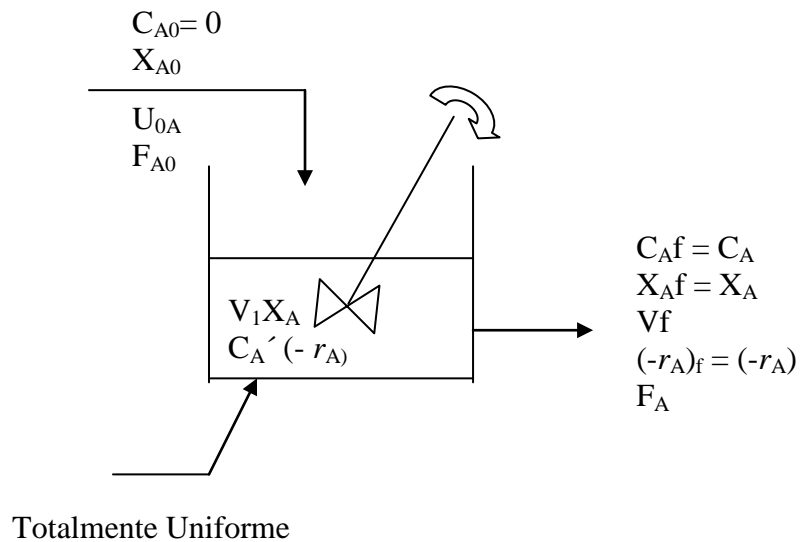
#### Ecuación general de diseño.-

#### Balance de materiales.

$$\left( \begin{array}{c} \text{Caudal de} \\ \text{entrada de} \\ \text{reactor} \\ \text{en el elemento} \\ \text{de volumen} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{caudal de} \\ \text{salida de} \\ \text{reactor} \\ \text{del elemento} \\ \text{de volumen} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{caudal perdido de} \\ \text{reactor debido a} \\ \text{la reacción química} \\ \text{en el elemento de} \\ \text{volumen} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{caudal de} \\ \text{acumulación} \\ \text{de reactor} \\ \text{en el elemento} \\ \text{volumen} \end{array} \right) \quad (16)$$

Como la composición es uniforme en todo el reactor, el balance puede referirse a todo el volumen del reactor , considerando el reactante A, el balance de materiales será:

$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{desaparición por reacción} + \text{acumulación} \quad (17)$$



## GRAFICO 2. Reactor CFSTR. (32)

Entonces; si  $F_{A0} = V_0 C_{A0}$  es el caudal molar del componente A en la alimentación al reactor, tenemos:

$$\text{Moles de A que entran} = F_{A0} (1 - X_A) = F_{A0}$$

Para  $t = t_0$

$$X_A = X_{A0} = 0$$

$$\text{Moles de A que salen} = F_A = F_{A0} (1 - X_A)$$



$$\left( \begin{array}{c} \text{Desaparición de A} \\ \text{por reacción,} \\ \text{moles/tiempo} \end{array} \right) = (-r_A) V = \left( \begin{array}{c} \text{moles de A que reaccionan} \\ \text{(tiempo)(volumen de fluido)} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{volumen} \\ \text{del reactor} \end{array} \right)$$

**Sustituyendo en la ecuación de balance de materiales.**

$$F_{A0} + F_{A0} (1 - X_A) = (-r_A)V$$

$$F_{A0} (1 - X_A) = (-r_A)V$$

$$F_{A0} X_A = (-r_A)V \quad (18)$$

Resolviendo para  $X_A$

$$X_A = \frac{(-r_A) V}{F_{A0}}$$

**Tiempo espacial.-** Es el tiempo necesario para tratar un volumen de alimentación igual al volumen del reactor, medido en condiciones determinadas.

**Introduciendo el concepto de tiempo espacial  $\tau$**

$$\tau = \frac{C_{A0} V}{F_{A0}} = \frac{\left( \frac{\text{moles de A que entran}}{\text{Volumen de la alimentación}} \right) (\text{volumen del reactor})}{\left( \frac{\text{moles de A que entran}}{\text{Tiempo}} \right)} \quad (19)$$

Multiplicando los dos miembros de la ecuación por  $C_{A0}$  obtenemos:

$$X_A C_{A0} = (-r_A) \frac{V C_{A0}}{F_{A0}} \quad (20)$$

Reemplazando la ecuación 19 en la ecuación 20 tenemos:

$$X_A C_{A0} = (-r_A) \tau$$

Donde el tiempo espacial en función de la concentración es igual:

$$\tau = \frac{X_A C_{A0}}{-r_A} \quad \rightarrow \quad \text{Ecuación General de diseño del biodigestor tanque agitado}$$

Esta ecuación puede ser escrita en función de otras variables

Por definición:

$$\tau = \frac{1}{S} ; S = \frac{1}{\tau} \quad (21)$$

Esta ecuación también puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{1}{S} = \frac{V}{v_0} = \frac{V C_{A0}}{F_{A0}} = \frac{X_A C_{A0}}{-r_A} \quad (22)$$

Donde:

$S$  = Velocidad espacial.(26)

$\tau$  = Tiempo espacial

$V$  = Volumen del reactor

$v_0$  = Caudal volumétrico

$C_{A0}$  = Concentración del reactante A

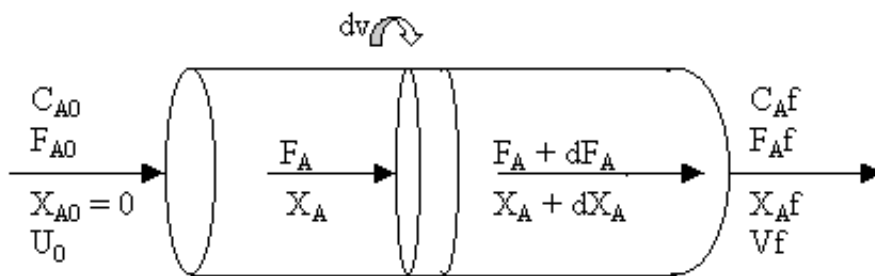
$F_{A0}$  = Caudal molar de la sustancia A, a un  $t = 0$

$X_A$  = Fracción de reactante A convertido en producto.

$-r_A$  = Velocidad de reacción basada en el volumen del fluido.

$t$  = Tiempo para alcanzar una conversión  $X_A$ .(26)

### 3.2.1.3 Reactor Tubular.



#### GRAFICO 3. Reactor de flujo en pistón.(32)

Este reactor se utiliza principalmente para el estudio cinético de reacciones heterogéneas, aunque en algunos casos se usa para completar el estudio de reacciones homogéneas.(28)

Se caracteriza por que el flujo del fluido a su través es ordenado, sin que ningún elemento del mismo sobrepase o se mezcle con cualquier otro elemento situado antes o después de aquél; en realidad, en este reactor puede haber mezcla lateral de fluido, pero nunca ha de existir mezcla o difusión a lo largo de la trayectoria de flujo.

La condición necesaria y suficiente para que exista flujo en pistón es que el tiempo de residencia en el reactor sea el mismo para todos los elementos de fluido o sea que los mismos tiempos de residencia impliquen flujo en pistón; esto se puede establecer solamente a partir del segundo principio de la termodinámica.

Aquí el sustrato y las concentraciones de organismos activos varían a lo largo del reactor. Así el control del volumen apropiado es un incremento de segmento a lo largo de la trayectoria de flujo en el reactor.(32)

En un reactor tubular la composición del fluido varía con la coordenada de posición en la dirección del flujo; en consecuencia, el balance de materia para un componente de la reacción ha de referirse a un elemento diferencial de volumen  $dV$ .

$$\text{Entrada} = \text{salida} + \text{desaparición por reacción} + \overset{0}{\text{acumulación}} \quad (23)$$

Este reactor al trabajar en estado estacionario, no hay acumulación.

Donde:

Entrada de A, moles/tiempo =  $F_A$

Salida de A, moles/tiempo =  $F_A + dF_A$

Desaparición de A por reacción, moles/tiempo =  $(-r_A) dV$

$$= \frac{\text{moles de A que reaccionan}}{(\text{tiempo})(\text{volumen del fluido reaccionante})} * (\text{volumen del elemento diferencial})$$

Sustituyendo estos términos en la ecuación 23 tenemos:

$$F_A = (F_A + dF_A) + (-r_A) dV \quad (24)$$

Teniendo en cuenta que:

$$dF_A = d(F_{A0}(1-X_A)) = -F_{A0} dX_A \quad (44)$$

Al remplazar en la ecuación 24 tenemos que:

$$F_A - (F_A + dF_A) - (-r_A) dV = 0 \quad (25)$$

Al operar se obtiene la siguiente ecuación:

$$dF_A = (-r_A) dV \quad (26)$$

En función de la conversión

$$F_A = F_{A0} (1 - X_A) \quad (27)$$

para  $t = t$

Diferenciando

$$dF_A = -F_{A0} dX_A \quad (28)$$

Sustituyendo en la Ecuación 26.

$$F_{A0} dX_A = (-r_A) dV \quad (29)$$

Integrando

$$F_{A0} \int_0^V dV = F_{A0} \int_{X_{A0}}^{X_{Af}} \frac{dX_A}{(-r_A)} \quad (30)$$

Multiplicando los dos miembros de la ecuación por  $C_{A0}$  e introduciendo la definición de tiempo espacial constituye la ecuación general de diseño para el reactor flujo pistón.

$$\frac{VC_A}{F_{A0}} = \tau = C_{A0} \int_{X_{A0}}^{X_{Af}} \frac{dX_A}{(-r_A)} \quad (31)$$

Donde:

$(-r_A)$  = Velocidad de reacción.

$V$  = Volumen.

$X_A$  = Fracción de reactante A

$F_{A0}$  = Caudal molar

$dV$  = Volumen elemento diferencial(16)

### 3.3 Diseño del bioreactor.

Para el diseño de un bioreactor se debe conocer el tamaño, tipo de biodigestor y las condiciones de operación óptimas

Las características geométricas del bioreactor determinan la trayectoria del fluido a través del mismo, y fijan las condiciones de mezclado que contribuyen a redistribuir la materia y el calor.

### 3.3.1 Parámetros requeridos para el diseño del bioreactor Batch

Los parámetros importantes para el diseño del bioreactor Batch son: pH,  $T^\circ$ ,  $C_s$ , Agitación.(26)

El pH, temperatura, concentración de sustrato y agitación son parámetros muy importantes que deben ser tomados en cuenta en el momento del diseño y construcción de un bioreactor, ya que estos parámetros garantizan la eficiencia en la conversión de materia orgánica a bioabono.

El pH tiene una gran influencia en el proceso de degradación, de la literatura se sabe que en el rango de 6-8 las bacterias presentan mayor actividad, fuera de este rango se corre el riesgo de que se detenga la reacción de los microorganismos.(32)

Las bacterias usualmente necesitan un promedio de *temperatura* de 30 a 40 grados centígrados, este valor varía dependiendo el tipo de bacteria presente. La temperatura debe mantenerse constante durante el proceso de biodegradación.(23)

Los bioreactores pueden operar a las siguientes temperaturas:

- Psicrófilos (0-20 °C)
- Mesófilos ( $\approx 36^\circ\text{C}$ )
- Termófilos (50-60 °C)

Los bioreactores más antiguos operaban a temperatura ambiente con mayores tiempos de retención. La mayoría de los bioreactores operan hoy a temperaturas mesófilas con buenos resultados de estabilidad y producción de gas (alrededor de  $2\text{m}^3$  biogás/ $\text{m}^3$  de digestor). El biogás es una mezcla de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  con un contenido típico en  $\text{CH}_4$  del 60 por 100.

La temperatura óptima de trabajo es la termófila ya que se alcanza la máxima tasa de producción de gas y se garantiza la destrucción de patógenos. Sin embargo a esta temperatura el proceso es el menos estable siendo necesario una supervisión más cuidadosa.

Es importante la *agitación*, pues permite mantener una temperatura y una concentración uniforme de nutrientes en todo el bioreactor, también cumple otras funciones como:

- Una buena suspensión de los microorganismos y nutrientes sólidos.
- Y una excelente dispersión de los líquidos inmiscibles presentes.(23)

La *Concentración* requerida de estiércol de ganado vacuno y materia prima, para obtener el bioabono requerido es en proporción 1:1 en peso.(30)