



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**Estudio de la dinámica de calentamiento de un reactor  
anaerobio utilizando energía solar**

**TESIS presentada por:**

**M.C. CLAUDIA PALOMARES RODRÍGUEZ**

**A la división de Estudios de Posgrado de la  
Facultad de Ingeniería Química como  
requisito parcial para obtener el  
grado de:**

**DOCTORA EN CIENCIAS  
EN  
INGENIERÍA QUÍMICA**

**Asesor: Doctor José Apolinar Cortés  
Coasesora: Doctora Ma del Carmen Chávez Parga**

**Morelia, Michoacán.**

**Mayo 2018**

---

## Resumen

Estudio de la dinámica de calentamiento de un reactor anaerobio utilizando energía solar

Por

M.C. Claudia Palomares Rodríguez

Mayo de 2018

Dirigida por: Dr. José Apolinar Cortés

Codirigida por: Dra. Ma Del Carmen Chávez Parga

Los reactores anaerobios son sistemas económicos y eficientes cuya temperatura óptima de operación es de 35 °C, la cual no se alcanza con las condiciones climáticas normales en la ciudad de Morelia y para incrementar su temperatura se ha hecho uso de energía eléctrica o combustibles fósiles con los correspondientes efectos negativos al ambiente. Con el fin de elevar la temperatura es necesario impulsar el uso de fuentes alternativas de energía que abastezcan los requerimientos energéticos sin que esto, cause daños adversos al ambiente o genere un costo representativo. La energía solar es una fuente energética limpia y económica, la cual es abundante en México prácticamente durante todo el año, lo que la hace ser una opción viable para el calentamiento de sistemas anaerobios.

En el presente proyecto de investigación se implementó un sistema escala piloto constituido por un reactor anaerobio aislado térmicamente con un volumen de 300 L, con un serpentín de intercambio térmico acoplado a un calentador solar de volumen igual a 60 L. Los parámetros de temperatura en el sistema reactor-calentador solar se controlaron y registraron mediante un equipo PID (proporcional, integral y derivativo). Posteriormente se evaluó en el sistema el impacto de parámetros meteorológicos como; radiación solar, temperatura ambiente, nubosidad, así como velocidad del viento. Los resultados muestran que en Morelia, Michoacán, México es posible mantener la temperatura del reactor constante en el orden de 35°C en el 50% de los meses del año, a pesar de la variabilidad que existe en los valores de los parámetros meteorológicos durante las diferentes estaciones del año. En los meses que no se alcanzó la temperatura de 35°C, la temperatura mínima que se tuvo en el reactor fue de 30°C, resultados que muestran la viabilidad del uso de energía solar.

**Palabras clave: Solar, energía, renovable, temperatura, reactor.**

## **Abstract**

Anaerobic reactor heating dynamic study using solar energy

By

M.C. Claudia Palomares Rodríguez

May 2018

Directed by: PhD. José Apolinar Cortés

Co-Directed by: PhD. Ma del Carmen Chávez Parga

Anaerobic reactors are economic and efficient systems; Which optimum operation temperature is 35 ° C, which is not achieves under Morelia's normal climatic conditions, to increase the temperature have been used electric energy or fossil fuels with corresponding environmental negative effect. In order to elevate the temperature is necessary to drive alternatives energy founts use that supply without energy cost or generate a representative cost. Solar energy is clean and economic energy fount. In Mexico all year it is abundant and it is option for anaerobic systems heating.

In present development project was implemented pilot scale system, integrated by; an anaerobic reactor with fiberglass thermic insulating and volume equal to 300 L, also was laid to cupper coil so coupled at solar heater with volume of 60 L. Temperature parameters on reactor-solar heater system were controlled through PID (proportional, integral and derivative) equipment. Consecutively, was evaluated impact about system, of meteorological parameters such; solar radiation, environment temperature, cloudy and air velocity. The results shows in Morelia, Michoacán, Mexico is possible maintain reactor temperature constant on the order to 35 ° C in the 50% month of the year, in spite of variability of meteorological parameters values on the different seasons. On the months where temperature of 35 °C was not reached, minimum reactor temperature obtained was 30 °C, this results shown viability on solar energy use.

**Key words: Solar, energy, renewable, temperature, reactor.**

# *Dedicatoria*

A mis papás **Ofelia** y **José Luis**, cada logro en mi vida es fruto de su esfuerzo, cariño y ejemplo.

Los quiero mucho.

## ÍNDICE

Resumen .....	i
Abstract .....	ii
Dedicatoria .....	iii
Lista de tablas .....	vi
Lista de figuras .....	vii
Lista de gráficas .....	viii
Nomenclatura .....	ix
Agradecimientos.....	xii
Capítulo I.....	1
Introducción.....	1
Introducción.....	2
1.1. Generalidades .....	3
1.2. Aporte científico.....	4
1.3. Hipótesis.....	4
1.4. Objetivo general .....	5
1.5. Objetivos particulares .....	5
Capítulo II.....	6
Marco teórico.....	6
2.1. Anaerobiosis.....	7
2.2. Microorganismos anaerobios.....	8
2.2.1. Agrupaciones de bacterias anaerobias (Biogránulos) .....	10
2.3. Lodos microbiológicos .....	10
2.4. Reactor RAFA .....	10
2.4.1. Operación de un reactor RAFA .....	11

2.5. Energías renovables.....	12
2.5.1. Biogás .....	12
2.5.2. Energía solar.....	13
2.6. Parámetros meteorológicos.....	13
2.7. Calentador solar .....	14
2.8. Antecedentes.....	14
2.9. Estado del arte .....	16
Capítulo III.....	18
Metodología.....	18
3.1. Construcción del RAFA .....	19
3.2. Desarrollo de la ingeniería básica y de detalle del serpentín de calentamiento 20	
3.3. Selección de un calentador solar.....	21
3.4. Descripción de la operación .....	22
3.4.1. Alimentación de agua al reactor.....	22
3.4.2. Sistema de control.....	23
3.5. Parámetros meteorológicos.....	23
3.6. Dinámica de calentamiento con energía solar.....	23
3.6.1. Balance de energía en el reactor .....	24
Capítulo IV.....	25
Resultados .....	25
4.1. Sistema reactor anaerobio-calentador solar.....	26
4.2. Dimensionamiento del serpentín .....	27
4.3. Selección del calentador solar.....	28
4.4. Dinámica de calentamiento .....	29

4.4.1. Enero.....	31
4.4.2. Febrero.....	34
4.4.3. Marzo .....	38
4.4.4. Abril .....	41
4.4.5. Mayo.....	44
4.4.6. Junio.....	47
4.4.7. Julio.....	50
Capítulo V.....	53
Conclusiones.....	53
Recomendaciones.....	55
Bibliografía .....	57
Anexo .....	63
A1. Diseño del serpentín de cobre .....	64
Consideraciones.....	64
Cálculo de la $h_{\text{externa}}$ .....	68
Consideraciones.....	68
Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.....	73
A2. Correlación de Pearson .....	76

## Lista de tablas

Tabla 2.1. Comparación de bacterias implicadas en la anaerobiosis.....	9
Tabla 4.1. Características del serpentín de cobre.....	27

## Lista de figuras

Figura 2.1. Diagrama de la anaerobiosis.....	7
Figura 2.2. Esquema del reactor RAFA.....	11
Figura 3.1. Diagrama de la estrategia metodológica.....	19
Figura 3.2. a)Armado del reactor b) Reactor aislado.....	20
Figura 4.1. Diagrama del sistema reactor anaerobio- calentador solar.....	26

## Lista de gráficas

Gráfica 4.1. a) Comportamiento de las temperaturas y radiación solar en el sistema durante una semana. b) Comportamiento de la nubosidad y la velocidad del viento durante una semana .....	29
Gráfica 4.2. a). Comportamiento de las temperaturas y radiación solar en el sistema en Enero. b). Comportamiento de la nubosidad y la velocidad del aire en Enero.....	31
Gráfica 4.3. a). Comportamiento de las temperaturas y radiación solar en el sistema en Febrero. b). Comportamiento de la nubosidad y la velocidad del aire en Febrero.....	34
Gráfica 4.4. a). Comportamiento de las temperaturas y radiación solar en el sistema en Marzo. b). Comportamiento de la nubosidad y la velocidad del aire en Marzo.....	38
Gráfica 4.5. a). Comportamiento de las temperaturas y radiación solar en el sistema en Abril. b). Comportamiento de la nubosidad y la velocidad del aire en Abril.....	41
Gráfica 4.6. a). Comportamiento de las temperaturas y radiación solar en el sistema en Mayo. b). Comportamiento de la nubosidad y la velocidad del aire en Mayo.....	44
Gráfica 4.7 a). Comportamiento de las temperaturas y radiación solar en el sistema en Junio. b). Comportamiento de la nubosidad y la velocidad del aire en Junio.....	47
Gráfica 4.8. a). Comportamiento de las temperaturas y radiación solar en el sistema en Julio. b). Comportamiento de la nubosidad y la velocidad del aire en Julio.....	50

## Nomenclatura

Abreviatura	Significado
A	Factor de frecuencia de colisiones (Ecuación de Arrhenius)
A	Radio del serpentín de cobre
$A_{ext}$	Área externa de transferencia de calor
$A_{int}$	Área interna de transferencia de calor
	Área de transferencia de calor que se considera como el área externa
As	externa
ABR	<i>“Anaerobic baffled reactor”</i>
AGV's	Ácidos grasos volátiles
Alc.	Alcalinidad
$\beta_e$	Coefficiente de expansión térmica
°C	Grados Celsius
Ca	Calcio
$CaCO_3$	Carbonato de calcio
$CH_4$	Metano
$CO_2$	Bióxido de Carbono
D	Diámetro
D	Día
$D_{ext}$	Diámetro externo
$D_{int}$	Diámetro interno
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
$DQO_r$	Demanda química de oxígeno removida
$E_a$	Energía de activación
$G_{rd}$	Número de Grashof
G	Fuerza de gravedad
$H_2$	Hidrógeno
$H_2O$	Agua
$H_2S$	Ácido sulfhídrico

H	Altura
$h_{ext}$	Coeficiente convectivo para el lado externo del tubo
$h_{int}$	Coeficiente convectivo para el lado interno del tubo
$h_{de1}$	Coeficiente de convección natural externa para tubo horizontal
$h_{de2}$	Coeficiente de convección natural externa para tubo vertical
	Constante cinética dependiente de la temperatura (Ecuación de Arrhenius)
K	Arrhenius)
$k_{agua}$	Conductividad térmica del agua
$k_{cobre}$	Conductividad térmica del cobre
kg	Kilogramo
Kj	Kilojoule
Kw	Kilowatt
L	Litro
	Longitud característica para transferencia de calor en tubo Horizontal
$l_{ce}$	Horizontal
$\dot{m}$	Flujo másico
$\mu$	Viscosidad dinámica
$m^2$	Metro cuadrado
$m^3$	Metro cúbico
Mg	Magnesio
mg	Milígramo
mol	Moles
Nus	Número de Nusselt para un tubo recto
Nuc	Número de Nusselt para un serpentín
pH	Potencial de hidrógeno
PID	Proporcional integral y derivativo
Pr	Número de Prandtl
R	Constante de los gases
rad	Número de Rayleigh
$Re_D$	Número de Reynolds
$R_{fext}$	Coeficiente de limpieza para pared externa

$R_{fint}$	Coeficiente de limpieza para pared interna
$R_{pared}$	Resistencia de la pared
S	Azufre
SPE	Sustancias poliméricas extracelulares
SS	Sólidos sedimentables
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
TRC	Tiempo de residencia celular
TRH	Tiempo de residencia hidráulico
U	Coeficiente global de transferencia de calor
Vce	Viscosidad cinemática
W	Watt

# *Agradecimientos*

A Dios, sé que no estoy sola en el camino porque me llevas de la mano.

A mis papás, su apoyo en los momentos difíciles ha sido muy importante, gracias por ser y estar.

A Adriana, por escucharme y aconsejarme, siempre es bueno contar contigo.

A Víctor, por acompañarme en la aventura y apoyar mis metas, has estado en las buenas y en las malas, gracias.

Al Doctor Apolinar y la Doctora Ma. del Carmen, por sus enseñanzas y dirección del proyecto de investigación.

Al M.C. Sergio Iván Martínez, por la ayuda y enseñanzas, sé que algo excelente te espera amigo.

Al Doctor José María Ponce, por su ayuda, aportaciones y consejos.

Al Doctor Jesús Pacheco, al Doctor Marco Antonio Martínez, al Doctor Eloy Conde, por sus aportaciones en este trabajo.

Al Observatorio Atmosférico de la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia, perteneciente a la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos de la UNAM, por los datos de Radiación solar proporcionados, así como al Doctor Carlos Anaya, por las facilidades prestadas para obtenerlos.

A la Estación Meteorológica de CONAGUA, ubicada en Morelia, Michoacán y al Ingeniero José Antonio León, por proporcionar datos de; temperatura del ambiente, velocidad del viento y nubosidad.

A CONACyT, por el financiamiento otorgado a través de la beca: CVU: 417565.

A la UMSNH, por ser mí casa de estudios durante los últimos 6 años.

A mis amigos, Omar, Paco, Chelis, Meli, Indira, Vianey, Dany, por los momentos amenos compartidos.

# Capítulo I

# Introducción

## Introducción

Dentro de un sistema biológico de tratamiento de aguas residuales la temperatura es un factor importante, debido a que puede acelerar o hacer más lento el proceso metabólico de los microorganismos. Los reactores anaerobios de tipo RAFA, son económicos y operan de forma efectiva a 35 °C para incrementar la remoción de materia orgánica así como la producción de biogás. Sin embargo, elevar la temperatura genera un incremento en el costo de tratamiento, es por esto, que es preciso emplear una fuente renovable de energía, como el sol.

En el presente proyecto de investigación se elevó la temperatura a 35° dentro de un reactor RAFA, el cual se calentó por medio de un calentador solar de tubos evacuados, en donde se evaluó el comportamiento de la temperatura dentro del sistema reactor anaerobio-calentador solar, posteriormente se contempló la influencia de distintos parámetros meteorológicos, tales como; radiación solar, velocidad del viento, temperatura ambiente, todo esto bajo condiciones de operación similares a las previamente establecidas en el tratamiento de agua residual proveniente de un rastro de la localidad, por lo cual, se estableció que la alimentación al reactor abarcaría un periodo de tiempo (8:00-14:00 h). Es importante mencionar que el sistema RAFA operó con un influente de agua potable, ya que el objetivo fue evaluar la dinámica de calentamiento por medio de un sistema solar, únicamente simulando condiciones operativas, tal dinámica fue evaluada durante 7 meses, los cuales abarcan el periodo de: Enero a Julio del 2016.

### 1.1. Generalidades

En el planeta tierra del 100% de agua existente, los océanos poseen aproximadamente el 97%, del 3% restante, un 2% corresponde al agua en forma de hielo y nieve sólida, mientras que el 1% pertenece a vapor de agua y nubes en la atmósfera, agua superficial en lagos, arroyos y depósitos, así como agua subterránea (Manahan, 2007).

Debido a la poca cantidad de agua de la cual se puede disponer y a que es un recurso vital para el ser humano y su disponibilidad en un futuro determinará el desarrollo de las civilizaciones, la insalubridad de este líquido cobra importancia ya que la generación de grandes volúmenes de aguas residuales, causa efectos adversos sobre la salud humana, el medio ambiente y el desarrollo industrial (Manahan, 2007).

Las principales causas que contribuyen a la generación de agua residual, son la sobrepoblación, diversidad y complejidad de los procesos industriales, incremento en el número de industrias, producción de elementos de consumo a gran escala y desechos de excretas a cuerpos de agua. Con el fin de minimizar y/o mitigar los diferentes niveles de contaminación que se tienen, es preciso conocer y ubicar las fuentes generadoras de aguas residuales, así como la composición de los efluentes, de modo que luego de ser localizadas y caracterizadas se pueda llevar a cabo un tratamiento adecuado, para que una vez tratadas, éstas puedan ser descargadas a cuerpos de agua, con la condición de que los parámetros evaluados se encuentren dentro de los estándares establecidos en la normatividad (Ramalho, 2003; Cheng *et al.*, 2013; Bustillo-Lecompte *et al.*, 2015), por ejemplo la NOM-001-ECOL-1996.

Por otra parte el conocimiento sobre los procesos naturales de degradación de los contaminantes presentes en las aguas residuales, ha permitido establecer que existen condiciones en ausencia de oxígeno que producen de manera simultánea energía y llevan a cabo una remoción de cargas orgánicas elevadas (5000-70000 mg/L DQO) (Bermúdez *et al.*, 1998; Rajab *et al.*, 2016). Así pues la generación y empleo de energías limpias a partir de fuentes renovables y/o desechos disponibles se ha impulsado en los últimos años debido a que se busca reducir el uso desmedido de

combustibles fósiles, los cuales han incrementado la concentración de compuestos con características de efecto invernadero y como consecuencia el cambio climático (Mayagoitia, 2007; International Energy Agency, 2010).

Los procesos anaerobios para presentar una eficiencia adecuada requieren temperaturas que se encuentran en el rango mesofílico, principalmente cuando el sustrato presenta cargas orgánicas altas (sobre 10000 mg/L de DQO) (Metcalf y Eddy., 2003; Hassanein *et al.*, 2015; Del Nery *et al.*, 2016), sin embargo, un incremento en la temperatura implica elevar los consumos energéticos, por esto es importante contemplar el uso de energías renovables, en este caso la energía del sol, la cual es abundante en el país (International Energy Agency, 2011), no obstante se debe considerar que esta es dependiente de ciertos parámetros meteorológicos, de los cuales se hace un análisis de los más importantes en el presente trabajo.

## 1.2. Aporte científico

Es importante conocer la dinámica de calentamiento del sistema, para evaluar las variaciones de temperatura, así como las posibles interferencias ocasionadas por parámetros meteorológicos mencionados anteriormente y de esta manera definir si es posible el empleo de la energía del sol a través de un calentador solar de tubos evacuados para mantener la temperatura de un reactor anaerobio en 35°C.

## 1.3. Hipótesis

El uso de la energía solar captada en un calentador solar de tubos evacuados permitirá mantener la temperatura de operación del reactor anaerobio en 35°C, durante el periodo Enero- Julio a una altura sobre el nivel del mar de 1920 m, con una latitud de 19° 42' 2" Norte y una longitud de 101° 11' 10" Oeste, considerando parámetros meteorológicos, esto en un sistema reactor anaerobio-calentador solar cuya relación de volumen es de 5:1.

#### 1.4. Objetivo general

Analizar la dinámica de calentamiento en un reactor anaerobio alimentado con flujo intermitente, calentado por medio de un calentador solar de tubos evacuados considerando parámetros meteorológicos.

#### 1.5. Objetivos particulares

- Llevar a cabo la construcción de sistema reactor anaerobio-calentador solar.
- Implementar un sistema de adquisición y control de datos.
- Alcanzar y mantener la temperatura de operación (35°C) del reactor anaerobio a través de la captura de energía solar.
- Realizar el levantamiento de datos del sistema reactor anaerobio-calentador solar así como de los parámetros meteorológicos, durante las estaciones; invierno, primavera y verano.
- Establecer el comportamiento del sistema reactor anaerobio-calentador solar para condiciones de alimentación intermitente.

# Capítulo II

# Marco teórico

## 2.1. Anaerobiosis

La digestión anaerobia es un proceso de degradación de materia orgánica que se realiza en ausencia de oxígeno, empleando como aceptor de electrones nitrato, sulfato o algún compuesto orgánico y se divide en cuatro etapas (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, (Figura 2.1) (Gray, 2010; Bustillo-Lecompte *et al.*, 2015). Durante la anaerobiosis la materia orgánica es transformada en biomasa y compuestos orgánicos en su mayoría volátiles. Esta tecnología en los últimos veinticinco años ha logrado ser competitiva en comparación con otras opciones como son los tratamientos fisicoquímicos o aerobios, por otra parte también se ha buscado acoplarlos con los tratamientos convencionales (Bermúdez *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2015; Bustillo-Lecompte *et al.*, 2016; Vidal *et al.*, 2016), debido a que durante este proceso se obtiene biogás el cual es una energía que puede ser empleada para satisfacer la demanda de combustibles fósiles (Feng *et al.*, 2016), además de lodos que son utilizados como bio-abonos, por poseer constituyentes como fósforo, nitrógeno y elementos traza (S, Ca, Mg).

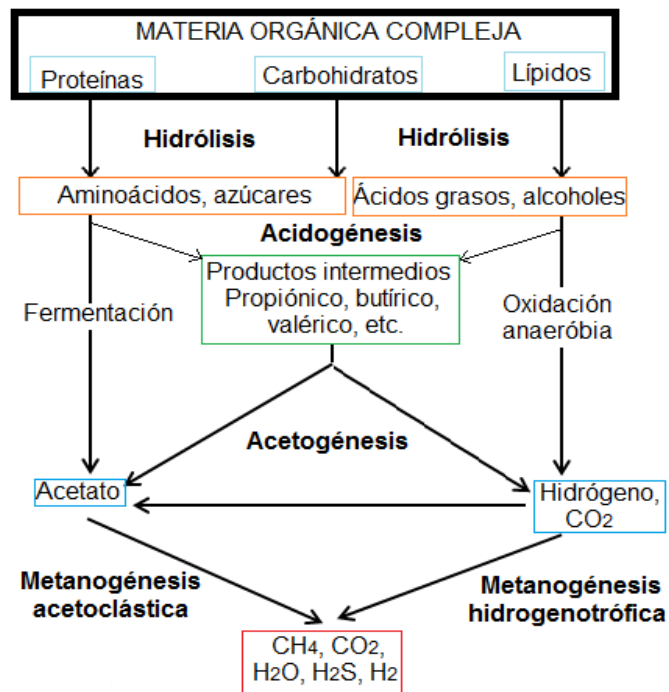


Figura 2.1. Diagrama de la anaerobiosis

Este proceso es adecuado para aguas residuales cuya carga orgánica es casi tan alta como la de los propios lodos, por ejemplo aquellas que son provenientes de suspensiones de origen animal (Winkler, 2008); sin embargo, se debe tener un control de algunos factores, ya que se ha reportado que a cargas orgánicas altas y bajos TRH existe aún una cantidad considerable de materia orgánica que no ha sido digerida (Menardo *et al.*, 2011).

La digestión anaerobia, presenta ventajas y desventajas, dentro de las primeras se encuentran; que el proceso no se ve limitado por la cantidad de oxígeno a abastecer ya que éste no es requerido, lo que lleva al ahorro de energía utilizada para el suministro de oxígeno, la generación de lodos es lenta (0.1-0.4 Kg de biomasa/Kg de DBO eliminada) provocando que los tiempos de purga sean mayores, así mismo permiten la recuperación de energía en forma de metano por lo tanto los costos de operación y mantenimiento son bajos y en el caso de tener un sistema de calentamiento algunos patógenos son eliminados. Las desventajas que se presentan son; la producción ácido sulfhídrico, el requerimiento de equipos grandes, tiempos de retención altos, un sistema completamente hermético lo que implica una inversión inicial alta así como también es determinante el tipo de sustrato, ya que de eso dependen los parámetros de control más importantes (Terreros *et al.*, 2009; Bustillo-Lecompte *et al.*, 2017).

## 2.2. Microorganismos anaerobios

Los microorganismos anaerobios se desarrollan en ausencia de oxígeno y principalmente bajo condiciones mesofílicas (20°C a 35 °C), y termofílicas (36°C a 70°C) (Castillo, 2005; Hassanein *et al.*, 2015; Feng *et al.*, 2016).

En la hidrólisis y acidogénesis las bacterias que intervienen son anaerobias facultativas, cuyas especies son: *Clostridium*, *Enterobacteriae*, *Propinibacterium*, *Bateroides*, *Micrococcus*, *Peptococcus*, *Desulphovibrios*, *Corynebacterium*, *Lactobacillis*, *Actinomyces*, *Staphylococcus* y *Escherichia coli*. En la etapa de acetogénesis se encuentran bacterias del género; *Clostriduim aceticum*, *Formacoaceticum* y *Aceto bacterium wooddi*. En la metanogénesis intervienen bacterias

que pertenecen al grupo *Archea*, y a las especies; *Methanozarcina*, *Metanobacterium*, *Metanobacillus* las cuales son bacterias cuya principal característica es de ser de lento crecimiento, (Osorio *et al.*, 2006).

En la tabla 2.1 se muestra que las bacterias hidrolíticas y acidogénicas tienen un tiempo de reproducción que puede variar de 3 horas a 3 días en el rango de temperaturas de 30°C a 65°C y de 3.5 a 7.8 unidades de pH, con vitalidad robusta que consiguen soportar variaciones importantes y presencia de oxígeno teniendo una producción de metano menor al 30%. Las bacterias metanogénicas poseen un tiempo de reproducción que se encuentra entre 6 y 14 días en el rango de temperaturas de 23°C a 55°C y un pH cercano a 7.8, su vitalidad es robusta, sin embargo mueren al contacto con el oxígeno, mientras que la producción de metano es mayor al 50%.

Tabla 2.1.Comparación de bacterias implicadas en la anaerobiosis

<b>Parámetros</b>	<b>Bacterias hidrolíticas y acidogénicas</b>	<b>Bacterias metanogénicas</b>
<b>Tiempo de reproducción</b>	De 3 horas a 3 días.	6-14 días.
<b>Temperatura óptima</b>	30°C a 65°C variable.	37°C a 55°C.
<b>Valor pH</b>	Mínimo 3.5 y máximo 7.8.	Cerca de 7.8
<b>Vitalidad</b>	Robusta, resisten perturbaciones en la temperatura y el valor de pH.	Robusta, resisten perturbaciones en la temperatura.
<b>Sensibilidad aerobia</b>	Trabajan también ante la introducción de oxígeno cuando se produce en la carga del depósito hidrólisis.	Mueren con el contacto con el oxígeno.
<b>Producción de biogás</b>	Poca cantidad de metano 0-30%.	Alta cantidad de metano >50%.

(Kepler, 2009).

### 2.2.1. Agrupaciones de bacterias anaerobias (Biogránulos)

Con el fin de generar protección contra ciertos tóxicos, las bacterias anaerobias poseen la habilidad de agruparse formando gránulos, generando una estructura compacta, lo cual es importante para el tratamiento de aguas residuales (Sponza, 2001). Estos gránulos son un microambiente donde cohabitan las distintas especies de bacterias (con morfotipos como cocos y bastones) que llevan a cabo la digestión anaerobia, su tamaño es de 1 a 3 mm (Metcalf, 2003), además se consideran como biopelículas de forma semiesférica constituida por tres capas, en el centro se encuentran las bacterias metanogénicas, ayudando así a crear un ambiente estrictamente anaerobio, en la capa intermedia las acetogénicas y en la superficial las acidogénicas (las cuales son bacterias facultativas), entre capa y capa se generan algunos espacios que son ocupados por sustancias poliméricas extracelulares (SPE), cuyo origen es biológico y ayudan a mantener la cohesión entre las bacterias. En su conjunto estos gránulos deben de poseer las características de tener alta actividad biológica y buena velocidad de sedimentación (Nieto *et al.*, 2005; Osorio *et al.*, 2007; Feng *et al.*, 2016).

### 2.3. Lodos microbiológicos

Estos lodos están compuestos en su mayoría por una serie de consorcios microbianos agrupados en biogránulos los cuales están conformados por bacterias anaerobias y pueden ser obtenidos a partir de excretas de ganado vacuno y porcino o bien se forman de manera natural al colocar agua residual en condiciones anaerobias por varios meses. La degradación de la materia orgánica está directamente ligada a transferencia de masa que se da en los gránulos (Gutiérrez *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2018).

### 2.4. Reactor RAFA

El Reactor Anaerobio de flujo ascendente con lecho fluidizado de lodos granulares (UASB) comúnmente es empleado en el tratamiento de aguas residuales con cargas orgánicas altas tales como; efluentes industriales, domésticos, municipales y

lodos, obteniendo excelentes resultados (Ramalho, 2003; Bustillo Lecompte *et al.*, 2015), su éxito se debe a que pueden alcanzar eficiencias de remoción desde 70% a 90%, lo cual depende de la composición del agua residual y las condiciones del medio (Rodríguez *et al.*, 2002; Bustillo-Lecompte *et al.*, 2017). El reactor RAFA cuenta con cuatro zonas el lecho de lodos en el cual los bio-gránulos se encuentran compactados, el manto de lodos mismo que se distingue por contener bio-gránulos dispersos, la zona de clarificado en la que se lleva a cabo una separación de las fases sólido-líquido gas y finalmente la zona de captación de biogás (Caicedo, 2006; Feng *et al.*, 2016).

#### 2.4.1. Operación de un reactor RAFA

Los reactores RAFA (Figura 2.2) son sencillos de operar y su funcionamiento consiste en realizar la alimentación por la parte inferior, de este modo el agua residual fluye hacia arriba a través del manto de lodos, al mismo tiempo debido al contacto de los bio-gránulos con el agua residual y a las condiciones anaerobias se genera biogás, mismo que al subir a través del reactor ayuda a mantener un mezclado dentro de éste, cuando el biogás llega a la superficie es atrapado en una cámara colectora de gases, la cual es colocada en la parte superior del reactor y sobre ésta misma se encuentra la salida del agua tratada. Una parte importante de la operación del reactor es cuidar la calidad de los efluentes, por lo que para evitar que los bio-gránulos salgan por el efluente líquido, es necesario que el reactor cuente con mamparas deflectoras que provoquen la separación del bio-gránulo del gas y evitar así que éstos sean arrastrados hacia la descarga.

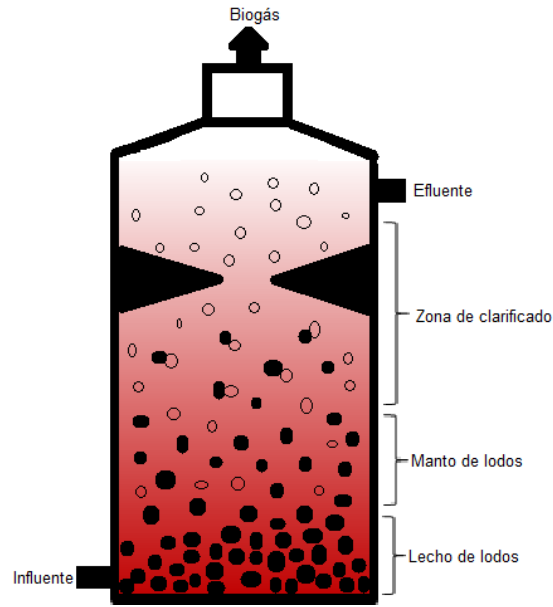


Figura 2.2. Esquema del reactor RAFA

## 2.5. Energías renovables

La demanda energética en el mundo crece continuamente por ello es importante buscar nuevas fuentes que sustituyan a los aceites, combustibles y al gas natural, en Sudamérica más específicamente en países como Argentina, Brasil, Chile y Perú el empleo de las llamadas energías limpias ya es común, encontrándose sobre todo la solar, eólica, geotérmica, hidráulica así como la biomasa (Cheuk *et al.*, 2014).

### 2.5.1. Biogás

El biogás es una mezcla gaseosa que se obtiene como resultado de la digestión anaerobia de materia orgánica, como lo son residuos cárnicos, de agricultura, ganadería, municipales, entre otros (Tippayawong *et al.*, 2010). Los gases que lo conforman y sus porcentajes aproximados son; metano ( $\text{CH}_4$ ) en un 70%, bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en un 29%, sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) en un 0.01%, vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) en 0.49%. Cabe mencionar que el porcentaje de metano presente depende del tipo de influente que se tenga, ya que varía según la composición del sustrato (el cual es convertido a razón de  $0.30 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg}$  de  $\text{DQO}_{\text{removida}}$ ) de aquí la importancia que presenta el tipo de agua residual que se desea emplear, debido a que permite evaluar la posibilidad de que el biogás sea utilizado como sustituto de combustibles fósiles

(Rasi *et al.*, 2006; Bermúdez *et al.*, 2010; Angelidaki *et al.*, 2018; Lindkvist *et al.*, 2018; Meyer *et al.*, 2018).

Los usos potenciales del biogás se encuentran en la generación de electricidad y calor, no obstante existen pros y contras para estas aplicaciones, en el caso de la producción de energía eléctrica se requiere una alta inversión inicial, lo que hace muy baja la tasa de retorno, además las necesidades de espacios físicos son grandes, mientras que para la generación de calor el biogás es empleado como combustible en las calderas para producir vapor, requiere una baja inversión inicial lo que conlleva a una alta tasa de retorno, presentando también como ventaja que el diseño y la implementación no son muy complejos.

### 2.5.2. Energía solar

La energía solar es la que se obtiene de forma directa del sol, además de ser utilizada como fuente de luz, la radiación solar que incide en la tierra también puede emplearse de dos maneras; la primera es mediante la transformación de la radiación solar en calor: la cual es llamada energía solar térmica y puede ser usada para producir agua caliente, la segunda es la transformación de la radiación solar en electricidad y es denominada energía solar fotovoltaica, la transformación se lleva en elementos semiconductores que integran los paneles solares fotovoltaicos (Rufes, 2010; International Energy Agency, 2011).

## 2.6. Parámetros meteorológicos

### Radiación solar

Se le conoce como radiación solar a la energía que proviene del sol en forma de ondas electromagnéticas y que es interceptada por la superficie terrestre. La radiación solar puede ser; térmica o fotovoltaica (Jamar *et al.*, 2016).

### Nubosidad

La cantidad de nubes que se presentan en la atmósfera, se le conoce como nubosidad. Esta es importante, puesto que las nubes influyen en la cantidad de radiación solar incidente en la superficie terrestre, sin embargo se debe tener en cuenta

que, la densidad de las nubes afecta de manera sobresaliente la radiación solar (Taki *et al.*, 2016).

#### Temperatura del medio ambiente

Se refiere a la temperatura que presenta el medio ambiente durante el día y se debe a la radiación electromagnética que recibe la tierra así como también es dependiente de la estación del año Taki *et al.*, 2016.

#### Velocidad del viento

Rapidez con la que el aire fluye en la troposfera, es un parámetro importante debido a que impacta en la sensación térmica Taki *et al.*, 2016.

### 2.7. Calentador solar

Un calentador solar es un sistema que eleva la temperatura del agua con energía solar sin necesidad de consumir gas o electricidad y está conformado por tres partes principalmente; El colector: consta de los paneles o calentadores solares propiamente dichos, el termotanque: Corresponde al depósito para almacenar el agua caliente, el sistema hidráulico: Son las bombas y tuberías por donde circula el fluido de trabajo.

Su funcionamiento es sencillo se orienta de tal manera que quede expuesto a la radiación solar para lograr la mayor captación de radiación solar, por otra parte el agua circula por el sistema debido a un efecto llamado termosifón el cual es provocado por las diferentes temperaturas mientras que la temperatura del agua se mantiene debido a que el termotanque está aislado para evitar pérdidas de calor (Cardozo *et al.*, 2005; Jamar *et al.*, 2016).

### 2.8. Antecedentes

En la sociedad actual se buscan fuentes de energía alternativas para disminuir el uso de los combustibles fósiles y una opción es la producción de metano, un recurso renovable, el cual puede ser obtenido del tratamiento de aguas residuales con altos contenidos de carga orgánica, a partir de la digestión anaerobia.

Una ventaja que presentan los procesos anaerobios, respecto a tratamientos aerobios, es que se tiene una disminución en el consumo de energía necesaria para

lograr la degradación de la carga orgánica, por no requerir la adición de oxígeno, además de que, la producción de biogás, puede ser utilizada dentro del proceso productivo o del propio tratamiento.

En particular el proceso productivo de la matanza de animales (rastró), genera agua residual con alto contenido de materia orgánica, microorganismos patógenos, sólidos suspendidos y componentes altamente pigmentados como la sangre; éste tipo de agua residual, al ser descargada sin el tratamiento adecuado, produce efectos adversos de diferente impacto sobre los cuerpos de agua, tales como malos olores, generación de fauna nociva, acumulación de nutrientes (nitrógeno y fósforo), afectación a la fauna así como aumento en los sedimentos generando anaerobiosis en el fondo de los cuerpos de agua (Signorini *et al.*, 2006).

El rendimiento en el proceso de degradación anaerobia se ve afectado por los factores de concentración de contaminantes, pH, alcalinidad, temperatura, ácidos grasos volátiles y concentración de nitrógeno y fósforo. Uno de los factores que tiene mayor impacto es la temperatura, ya que se ha encontrado que en el rango mesófilo (20°C – 35°C) se favorece la producción de biogás (Cuetos *et al.*, 2008), debido a la aceleración de las reacciones en cada fase de la anaerobiosis.

La etapa más importante del proceso de tratamiento de aguas residuales por anaerobiosis es la de reacción y dada su trascendencia, se han probado diversos tipos de reactores con diferentes configuraciones, cuya finalidad es maximizar la generación de biogás. En particular cuando se precisa la degradación de materia orgánica presente en aguas residuales, el reactor comúnmente empleado es el denominado Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente con lecho fluidizado de lodos granulares, también conocido como RAFA por sus siglas en inglés: “*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*” (Rodríguez *et al.*, 2010).

Dentro del RAFA la temperatura es un factor importante, ya que determina las especies existentes así como la remoción de carga orgánica y la producción de biogás. Este último, en los albores de la aplicación de los procesos anaerobios, se comenzó a implementar para el alumbrado y calentamiento en los tratamientos de aguas

residuales, lo que amplió el panorama, encontrando potencial en efluentes de varias industrias (Bermúdez *et al.*, 1998). De igual manera la energía solar la cual es una energía renovable y abundante en casi todas las partes del mundo todo el año puede ser empleada en tecnologías de tratamiento de aguas residuales, con el propósito de ayudar a incrementar la temperatura de los sistemas de tratamiento de forma económica (Zhenjie, *et al.*, 2012).

Debido a la necesidad de dirigir la investigación hacia la implementación de tecnologías que favorezcan el desarrollo sustentable del país, es preciso impulsar el uso de energías renovables, ya que además de contribuir a disminuir el impacto al medio ambiente también se contribuye con la generación de nuevos empleos (Mayagoitia, 2007).

## 2.9. Estado del arte

En el 2009 Bodkhe estudió el efecto del tiempo de residencia en la eficiencia del proceso de tratamiento en un ABR (*Anaerobic baffled reactor*), y realizó una evaluación de la eficiencia de este tipo de reactor en el tratamiento de aguas residuales municipales, así como también presentó la configuración del ABR. Los resultados muestran que el proceso de estabilización llevó 90 días, mientras que la evaluación llevada a cabo durante 375 días a 11 TRH's distintos que van desde 6 días hasta 3 h muestran que el mejor TRH fue de 6 horas obteniendo una eficiencia de reducción de sólidos suspendidos (SS), DBO y DQO de 86%, 87% y 84% respectivamente con un rendimiento de producción de biogás de  $0.34 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{Kg DQO}_r$  del cual un 67% fue metano.

Yiannopoulos y colaboradores en el 2008 diseñaron un sistema de calentamiento solar para un reactor anaerobio, con el fin de mejorar el tratamiento de agua residual o bien de lodo biológico. Para esta propuesta la energía solar fue absorbida por colectores de platos los cuales la transfieren a un tanque colector de calor, dicho calor fue suministrado continuamente a un reactor anaerobio de filtro, con agua a una temperatura máxima de 35°C. Además un modelo matemático fue descubierto por la predicción de la distribución de la temperatura con el reactor bajo condiciones de

estado estable. Los resultados preliminares están basados en el comportamiento de la simulación del modelo con datos meteorológicos de varias regiones geográficas del mundo y sugiere que la propuesta del reactor anaerobio solar es prometedora y amigable con el ambiente.

Yiannopoulos y colaboradores en 2012 evaluaron el rendimiento de un sistema solar diseñado para calentar un reactor de filtro anaerobio el cual trató agua residual municipal. Se demostró que las altas temperaturas dentro del reactor favorecen el rendimiento y la estabilización del reactor ya que a 20°C se obtuvo una remoción de DQO del 59% y a 35°C la remoción incremento a 80%. La demanda de calor y la disipación fueron obtenidas mediante un modelo matemático y se demostró que la temperatura se mantiene casi durante todo el año sobre 20°C. Además simularon el mismo sistema pero con diferentes volúmenes, concluyendo que el reactor anaerobio solar además de ser amigable con el ambiente es atractivo por sus nulos costos energéticos.

Yuan y colaboradores en 2011 diseñaron un sistema de calentamiento solar para producción de biogás reportando datos de un mes donde se obtuvieron condiciones críticas de bajas y altas temperaturas, obteniendo que en el mejor de los casos pudieran lograr un rendimiento de 0.5m<sup>3</sup> de biogás/m<sup>3</sup>d a partir de excretas de ganado y a una temperatura de 35°C. Por otra parte concluyeron que el sistema de captación solar (calentador solar de tubos en U) de 2 m<sup>2</sup> expuesto durante 8 horas a la radiación solar puede abastecer los requerimientos energéticos de un digestor de 6 m<sup>3</sup>.

En 2013 Palomares, operó un reactor del tipo RAFA escala piloto (1100 L), controlando la temperatura en el rango mesofílico (35± 2°C), obteniendo una alta eficiencia de remoción de carga orgánica, la cual en promedio se encontró en 86% así como en la producción de biogás, la cual fue de 0.55 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Kg DQO<sub>r</sub>, en un TRH de 48 h.

Wang y colaboradores en 2017 proponen un reactor anaerobio solar para las provincias de la región Suroeste de China, obteniendo como resultado que es una propuesta viable, sin embargo en los meses de invierno, es complicado mantener la

temperatura de fermentación (35°C), por lo que se hace la implementación de un tanque que almacena energía calorífica, mejorando la producción de biogás, la cual va 12.33 m<sup>3</sup> con el calentador solar instalado a 13.56 m<sup>3</sup> con el tanque de almacenamiento.

# Capítulo III

# Metodología

La presente investigación se realizó en la ciudad de Morelia Michoacán, México, la cual se encuentra localizada a 19°46'06" Latitud Norte, 101° 11' 22" Longitud Oeste con una altitud media de 1920 metros sobre el nivel del mar y un clima templado húmedo.

Se realizó la siguiente estrategia metodológica:

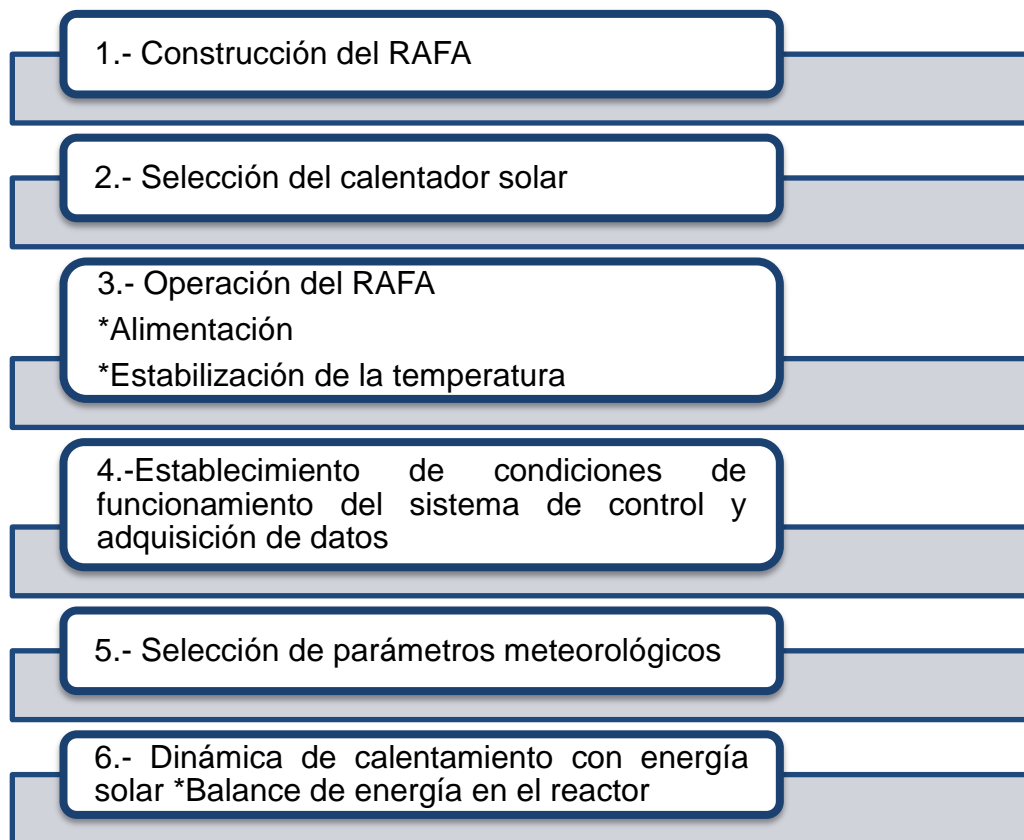


Figura 3.1. Diagrama de la estrategia metodológica

### 3.1. Construcción del RAFA

Se construyó el reactor anaerobio con un volumen de 300 L, se tomaron en cuenta: las zonas de reacción, de alimentación y salida de agua residual tratada, además de la captación de biogás, así como el acoplamiento del serpentín de cobre y el termopar tipo "K" dentro del reactor (Figura 3.2 a).

En la tapa del reactor se garantizó un sellado hermético, así como en las tuberías y válvulas que se colocaron. Para las pruebas de hermeticidad se llenó el tanque con agua limpia y se revisó el nivel del agua dentro, por otra parte el tanque se aisló con

dos pulgadas de fibra de vidrio a la que se le colocó un recubrimiento de resina para evitar los daños generados por el sol y la lluvia (Figura 3.2 b).

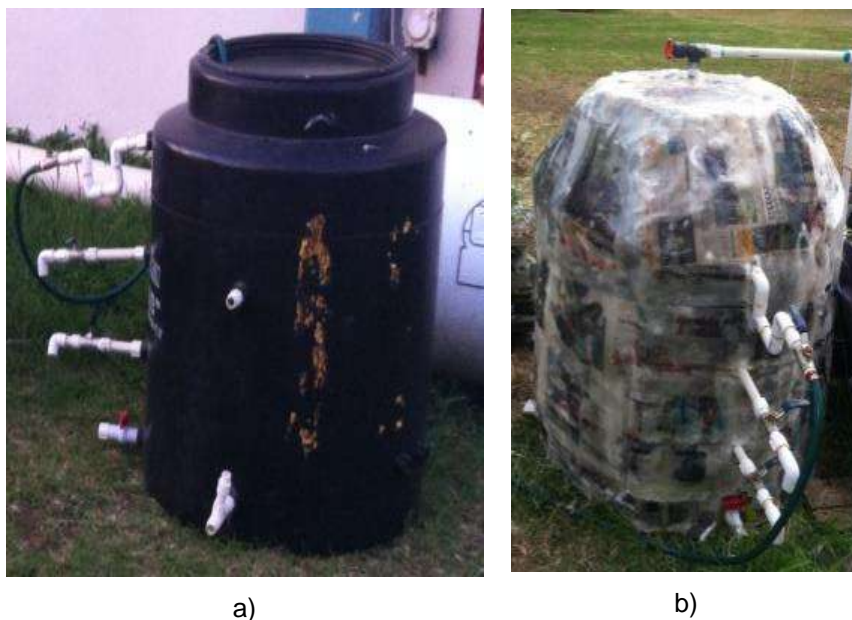


Figura 3.2. a) Armado del reactor, b) Reactor aislado

### 3.2. Desarrollo de la ingeniería básica y de detalle del serpentín de calentamiento

Se realizaron los cálculos necesarios para diseñar un serpentín de cobre (Anexo), mismos que comprenden: el cálculo del coeficiente de transferencia de calor del lado interno del tubo, el coeficiente de calor del lado externo del tubo y finalmente el coeficiente global de transferencia de calor.

Los criterios de diseño empleados fueron:

- Material empleado: cobre; por su alta conductividad térmica.
- Diámetro del serpentín: 54 cm; limitado por la tapa del tanque.
- Diámetro interno del tubo de cobre: 3/8 pulgada, es el diámetro comercial del tubo de cobre flexible.

Consideraciones:

- La temperatura del agua de entrada es constante 45°C.
- El reactor es un recipiente hermético.
- Dentro existen fluidos corrosivos.
- El reactor se encuentra enchaquetado con 2 pulgadas de fibra de vidrio.
- El movimiento del fluido es despreciable, debido a la baja velocidad de éste dentro del reactor (0.42 L/min), comparada con la velocidad que fluye por dentro del serpentín (19.2 L/min).

Una vez que se establecieron consideraciones y criterios de diseño se llevó a cabo la construcción del serpentín y la adaptación al reactor (Figura 3.3), posteriormente se realizaron pruebas de hermeticidad, que consistieron en hacer pasar agua a presión por el serpentín de cobre colocado dentro del reactor y se revisaron posibles fugas.



Figura 3.3 Serpentín de calentamiento

### 3.3. Selección de un calentador solar

Se realizó una investigación sobre los tipos de calentadores solares que pudieron ser empleados y se llevó a cabo la elección de un calentador solar de tubos evacuados (7 tubos) con un volumen de 60 L (Figura 3.4), el cual presentó las siguientes ventajas; es un equipo comercial (marca *Sunergy*) y posee características fundamentales para el uso que se requiere como; las temperatura de calentamiento de agua (puede alcanzar

80°C), la facilidad de manipulación (compacto, liviano, de fácil transporte) y el volumen de agua a calentar (300 L, volumen del reactor).



Figura 3.4. Calentador solar de tubos evacuados

Posteriormente se colocó el calentador de manera que se expusiera el mayor tiempo posible a la radiación solar, evitando la sombra provocada por árboles o edificios, además se orientó hacia el Sur con una inclinación de 15°C hacia el Este con el fin de incrementar su eficiencia (Sheng, 1986) así mismo se acondicionó para que el calentador alimentara con agua caliente un serpentín de cobre que se instaló en la parte inferior del reactor con el propósito de mantener la zona del lecho de lodos microbiológicos a una temperatura de 35°C±2°C.

### 3.4. Descripción de la operación

#### 3.4.1. Alimentación de agua al reactor

Con la finalidad de simular las condiciones de producción de agua residual en la industria, en la cual se tiene un régimen semicontinuo de generación de la misma, se controló la alimentación de agua al reactor con el mismo régimen, alimentando de forma continua agua de 8:00 am a 14:00 pm (durante 6 horas), con un flujo promedio de 25 L/h para posteriormente detener la alimentación al reactor, hasta iniciar un nuevo ciclo.

### 3.4.2. Sistema de control

La función objetivo del sistema de control fue mantener la temperatura dentro del reactor en el orden de 35 °C con una variabilidad de  $\pm 2$  °C, para lo cual se establecieron las siguientes restricciones:

- 1) El sistema de calentamiento entra en operación, si la temperatura en el termotanque (ST-1) es mayor o igual a 40°C y la temperatura dentro del reactor (ST-2) es menor a 35°C.
- 2) El sistema de calentamiento no opera, si la temperatura en el termotanque (ST-1) es mayor o igual a 40°C y la temperatura en el reactor (ST-2) es mayor o igual a 35°C.
- 3) El sistema de calentamiento no opera si la temperatura del termotanque (ST-1) es menor a 40°C y la temperatura dentro del reactor (ST-2) es menor a 35°C.
- 4) El sistema de calentamiento no opera, si la temperatura del termotanque (ST-1) es menor a 40°C y en el reactor (ST-2) es igual o superior al a 35°C.

### 3.5. Parámetros meteorológicos

Como parte del estudio de la dinámica de calentamiento solar, se realizó una selección de los siguientes parámetros meteorológicos; radiación solar, velocidad del viento, nubosidad y temperatura ambiente, los cuales presentan influencia significativa y directa sobre el sistema reactor-calentador solar, es decir, mediante el análisis del impacto directo de la radiación solar, las pérdidas y ganancias de calor en el reactor y en el termotanque (Taki *et al.*, 2016).

### 3.6. Dinámica de calentamiento con energía solar

El monitoreo y registro de las temperaturas en el sistema reactor-calentador solar, se realizó durante cada hora, diariamente por siete meses (enero-2016 a julio-2016). A efecto de visualizar de una mejor manera el comportamiento de la dinámica de calentamiento, se consideró el día 20 de cada mes como representativo.

### 3.6.1. Balance de energía en el reactor

De manera global se considera que en el reactor se establece el siguiente balance térmico (ecuación 3.1):

$$Q_R = Q_{SH} + Q_{RAD} - Q_{EL} - Q_{EFLU} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Donde:

$Q_R$ = Cantidad de calor en el reactor

$Q_{SH}$ = Cantidad de calor que el calentador solar puede suministrar al reactor

$Q_{RAD}$ = Cantidad de calor ganado por efecto de la radiación solar

$Q_{EL}$ = Cantidad de calor por pérdidas al ambiente

$Q_{EFLU}$ = Cantidad de calor perdido por efecto de alimentación de agua fría y descarga de agua caliente.

La  $Q_{EFLU}$  se puede evaluar considerando la temperatura de alimentación de agua fría que entra al reactor y la temperatura del agua caliente que sale del reactor, a través de la Ecuación 3.2:

$$Q = mC_p\Delta T \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Donde  $m$  es la cantidad de masa de agua alimentada al reactor en un periodo de 6 horas, para desplazar un volumen de 150 litros de agua; 25 L/h; el  $C_p$  del agua en un rango entre 17°C y 40°C es de 4.184 kJ/Kg K; la  $\Delta T$  se establece de manera precisa en cada uno de los días.

Para el análisis de los resultados obtenidos se definieron tres zonas, que permiten realizar un análisis en función del tiempo de alimentación de agua fría al reactor, periodo de radiación solar y el periodo de 24 horas del día.

# Capítulo IV

# Resultados

#### 4.1. Sistema reactor anaerobio-calentador solar

El sistema utilizado para la determinación de la dinámica de calentamiento, se muestra en la Figura 4.1, en donde se representan los siguientes equipos: un reactor de 300 L (T-1), el cual en su interior cuenta con un serpentín de calentamiento de cobre de 7 m de largo con un área de transferencia de calor igual a  $0.21 \text{ m}^2$ , un calentador solar de tubos evacuados marca Thermosol modelo SEI-15-1800/58 con 7 tubos evacuados y un termotanque de 60 L de capacidad, una bomba centrífuga (B-1) marca MARCH MFG INC., modelo AC-3C-MD, con flujo máximo de 10 GPM, el cual es controlado por una válvula solenoide (VS-1) marca Parker modelo 7321 de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro nominal y un tablero de control PID-QUADRO de lógica difusa.

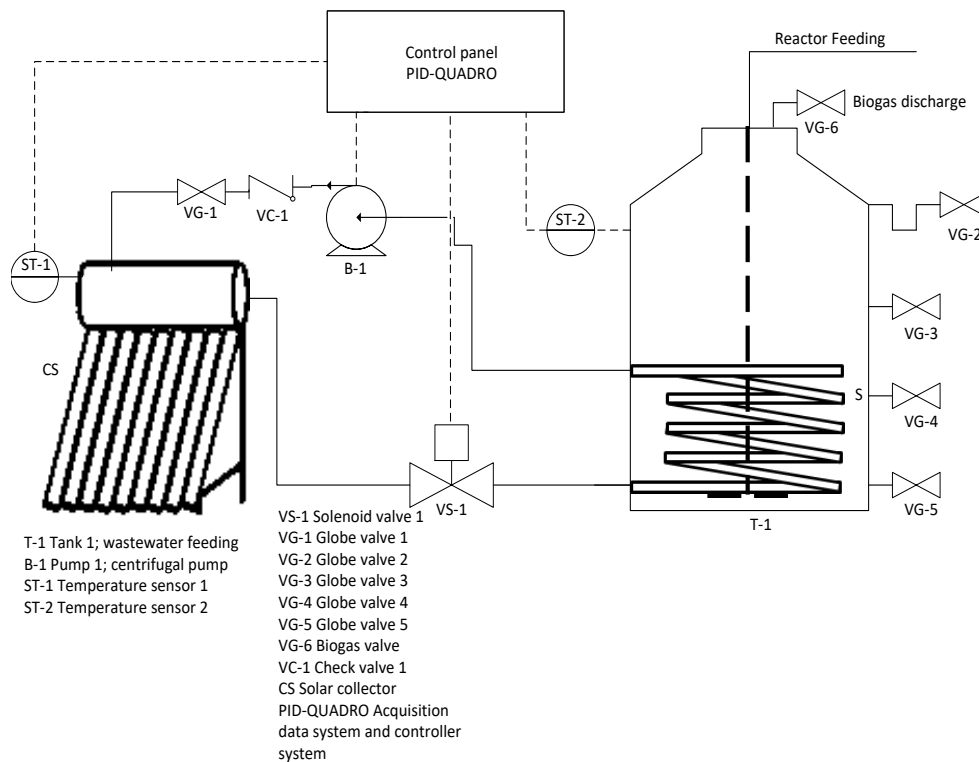


Figura 4.1. Diagrama del Sistema Reactor anaerobio-calentador solar

#### 4.2. Dimensionamiento del serpentín

A partir de los cálculos realizados (Anexo), se obtuvo un serpentín (Figura 4.2) con las siguientes características (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Características del serpentín

Diámetro externo	0.009525 m
Diámetro interno	0.007938 m
Longitud	7 m
Área de transferencia de calor	0.2094 m <sup>2</sup>
Material	Cobre
Coefficiente Global de transferencia de calor	0.8112 Kw/K*m <sup>2</sup>



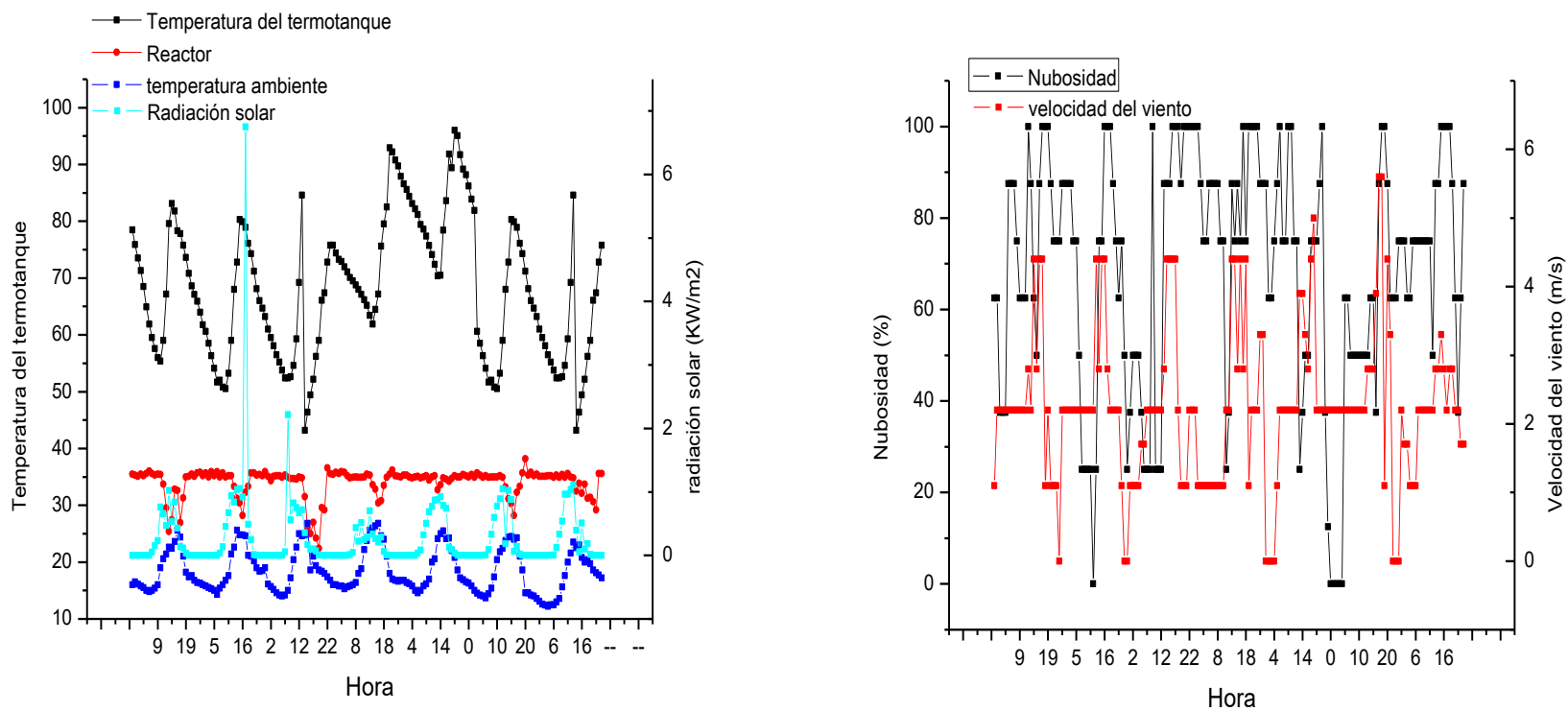
Figura 4.2. Serpentín de cobre

#### 4.3. Selección del calentador solar

La selección del calentador solar se llevó a cabo de acuerdo a las características funcionales y económicas del sistema de calentamiento solar, ya que los tubos evacuados en caso de que alguno sufra alguna falla, puede ser reemplazado únicamente el tubo dañado, por otra parte, el termotanque alcanza temperaturas elevadas ( $100^{\circ}\text{C}$ ) y la temperatura se recupera de forma más rápida debido a que están cerrados herméticamente.

Por lo tanto el calentador solar de tubos evacuados con el que se trabajó fue uno cuyo volumen es de 90 L, incluido el volumen de 7 tubos, se ubicó con una orientación hacia el Sur y una inclinación de  $15^{\circ}$  hacia el Este

## 4.4. Dinámica de calentamiento

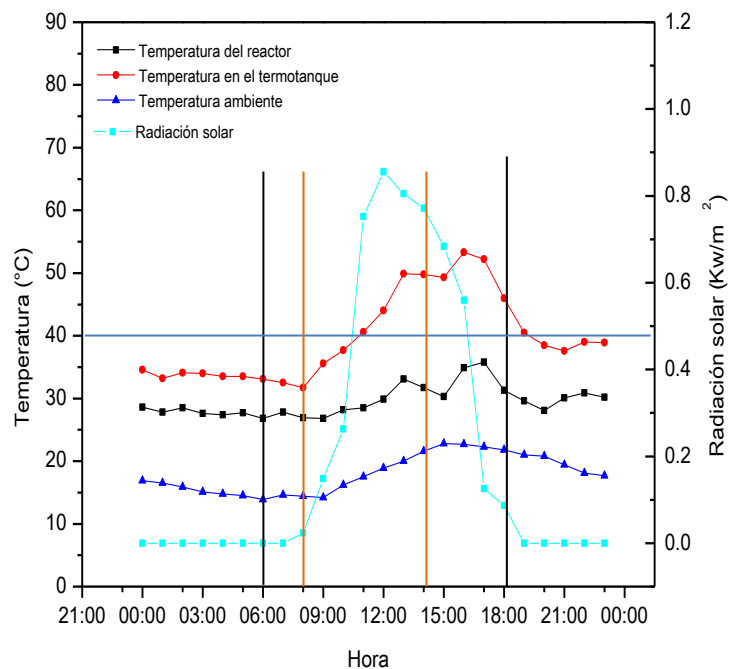


Gráfica 4.1 a) Comportamiento de las temperaturas y radiación solar en el sistema durante una semana. b) Comportamiento de la nubosidad y la velocidad del viento durante una semana

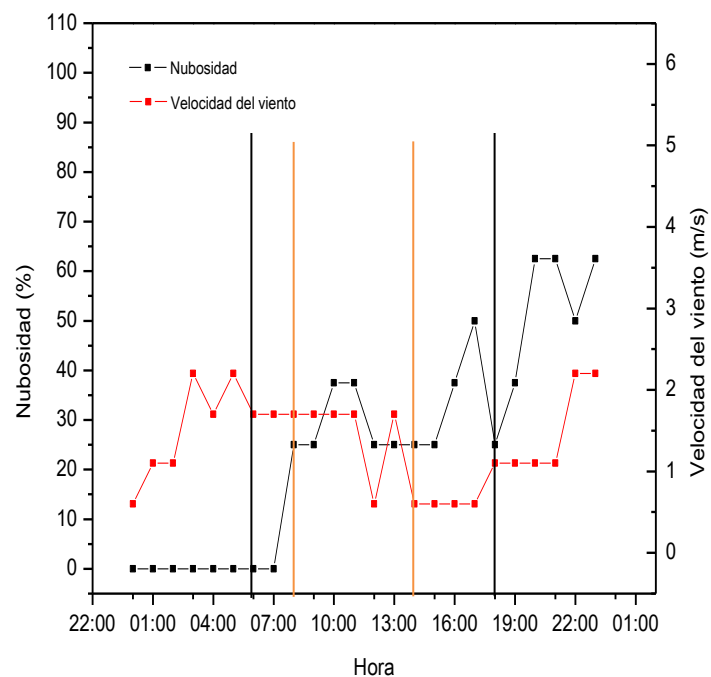
El comportamiento de las temperaturas del termotanque, del reactor, del medio ambiente y la radiación solar se muestran en la Gráfica 4.1. a), donde se observa que el comportamiento es cíclico, es decir, que es repetitivo a través de los días, con variaciones presentes con respecto al día, lo cual, es dependiente de la velocidad del viento así como de la nubosidad, que como se observa en la Gráfica 4.1. b), presentaron valores elevados durante los días del periodo evaluado en la Gráfica 4.1.

Por otra parte se observa que, el reactor alcanzó una temperatura estable ( $35^{\circ}\text{C}$ ) durante casi todo el día, ya que durante las horas sin sol (noche principalmente), la temperatura disminuyó notablemente, sin embargo, estos decrementos, se presentaron con menor frecuencia en el transcurso de los días. Cabe mencionar que, la temperatura en el termotanque se encontró siempre sobre  $40^{\circ}\text{C}$ , a pesar de que la radiación solar presentó valores bajos ( $1.2 \text{ KW/m}^2$ ), ocasionados por la alta nubosidad (hasta 100%) durante la mayor parte del tiempo, este fenómeno se debe a que la temperatura del reactor se mantuvo la mayoría del tiempo estable ( $35^{\circ}\text{C}$ ), sin embargo, el termotanque presenta a ciertas horas (15:00-16:00 h) decrementos notables en la temperatura a pesar de que el reactor, no requería agua caliente, dicho comportamiento es debido a un exceso de presión en el calentador solar ocasionado por un incremento en la temperatura del agua, por lo tanto el sistema desfoga agua caliente, representando una pérdida de calor importante en el termotanque.

4.4.1. Enero



a)



b)

Gráfica 4.2. a). Comportamiento de las temperaturas y radiación solar en el sistema en Enero. b). Comportamiento de la nubosidad y la velocidad del aire en Enero.

En la gráfica 4.1 a) se muestran los perfiles de temperatura ambiente, del termotanque, del reactor RAFA y el seguimiento de la radiación solar del mes de Enero del 2016. Donde se observa que la temperatura del ambiente a las 00:00 horas se encuentra en el orden de 17 °C, la cual disminuye hasta los 15 °C a las 9:00 am y a partir de esta hora incrementa la temperatura alcanzando un máximo de 22 °C a las 15:00 horas, a partir de la cual decrece hasta los 18 °C a las 23:00 h. En el caso del termotanque se presenta una temperatura menor a 40 °C en el periodo de las 00:00 h hasta las 11:00 h, después de este periodo se presenta un incremento alcanzando un máximo de 54 °C a las 17:00 h. Durante el periodo de radiación que comprende de las 7:00 am hasta las 19:00 h, se presentó una radiación global durante el día de 5.075 Kw-h/m<sup>2</sup>, con un valor máximo de 0.88 Kw/m<sup>2</sup> a las 12:00 h tiempo local. La radiación global se generó un calor disponible en el termotanque con temperatura mayor de 40°C, de 96709.158 KJ/h (incluir en la metodología).

En la gráfica 4.2 b) se observan los perfiles de porcentaje de nubosidad y velocidad del viento, los cuales muestran un comportamiento errático. Con respecto a la nubosidad se realiza una descripción dentro del período de radiación solar, el cual comienza a partir de las 6:00 h, con una nubosidad de 0% y a las 7:00 h incrementó a 25%, para posteriormente continuar elevándose hasta un 37% donde se mantiene constante hasta las 11:00 h y comienza a decrecer hasta un 25% a las 15:00 horas, para nuevamente presentar un comportamiento fluctuante, alcanzando un máximo de 50% a las 17:00 h. Por otra parte, la descripción del comportamiento de la velocidad de viento se realiza en el periodo de 24 horas; entre las 0:00 y las 6:00 se mantuvo un comportamiento fluctuante de la velocidad de viento entre 0.6 y 1.7 m/s respectivamente con un máximo 2.7 m/s a las 03:00 h; en el periodo de 6:00 h a 11:00 h se mantiene estable (1.7 m/s) de la misma manera que sucede de 14:00 h a 17:00 h (0.7 m/s), a partir de dónde incrementó a 1 m/s, este valor no presentó variaciones hasta las 21:00 h, para posteriormente llegar hasta 2.2 m/s a las 00:00 h.

El perfil de temperatura dentro del reactor sigue un comportamiento similar al de la temperatura del termotanque con un gradiente de temperatura que se incrementa durante el periodo de radiación solar. Una particularidad que se presenta en los perfiles de temperatura, se presenta a las 15:00 horas en donde se observa un “disturbio” por efecto del incremento momentáneo de la nubosidad.

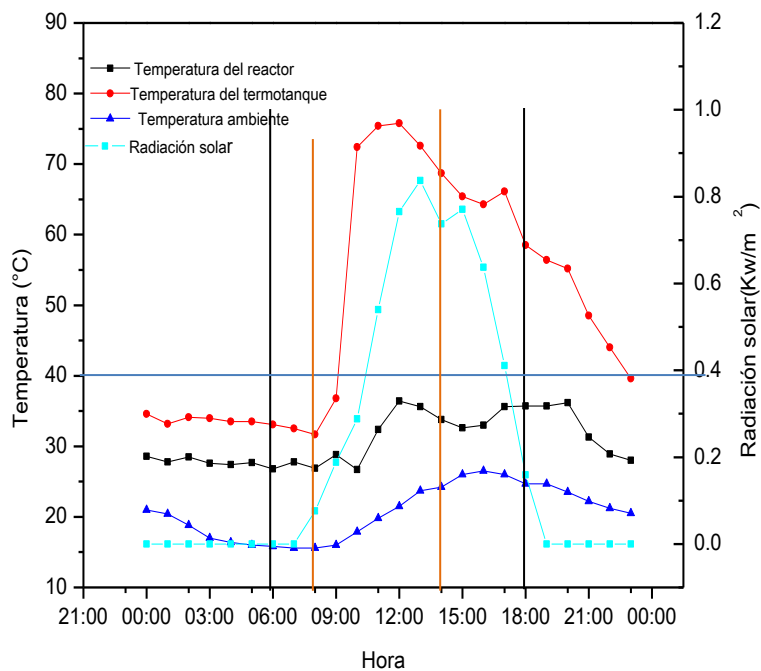
Dentro del reactor se presentó una ligera disminución de temperatura, entre las 00:00 y las 8:00 h, lo cual se puede atribuir a pérdidas al entorno por disminución en la temperatura ambiente y presencia de viento, ya que, al incrementar la velocidad del viento provoca a su vez un aumento en las pérdidas de calor. A partir de las 10:00 h hasta las 12:00 h se observa un ligero incremento en la temperatura del reactor por efecto de; radiación solar, ascenso en la temperatura del ambiente, ascenso en la temperatura del termotanque y disminución en la velocidad de viento.

A partir de las 12:00 horas se presentó un aumento en la temperatura del reactor, como consecuencia de incremento en; la radiación solar, la temperatura en el termotanque y en el ambiente, disminución en la velocidad de viento.

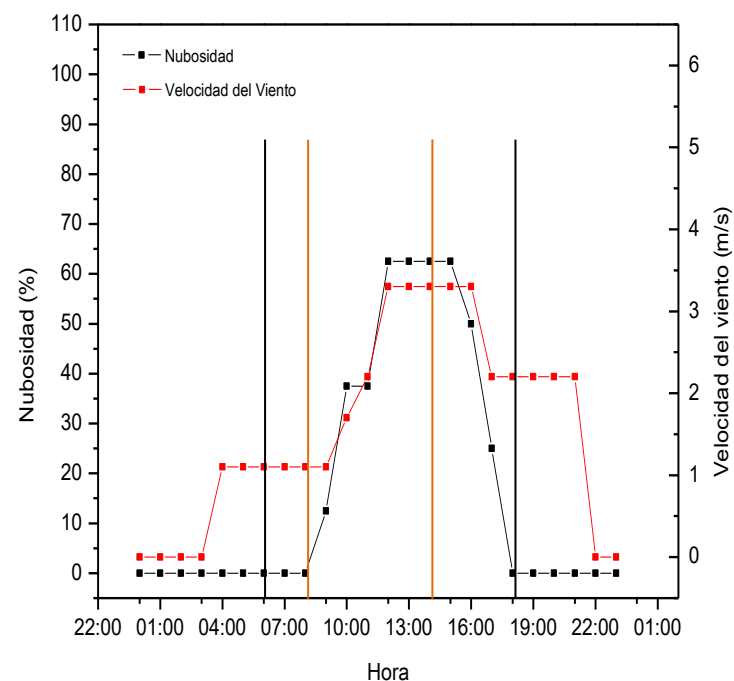
Por otra parte a partir de las 17:00 horas la temperatura del reactor decreció por efecto de la disminución de temperatura en el termotanque, radiación solar, temperatura ambiente e incremento en la velocidad del viento, deteniéndose el proceso de transferencia de calor del termotanque al reactor a las 19 horas, debido a que a partir de ésta hora la temperatura en el termotanque es menor a 40°C.

En términos generales se observa que en el mes de enero las condiciones climáticas y la cantidad de energía que se almacena en el captador solar no son suficientes para mantener el reactor en 35°C durante todo el día, manteniéndose éste en el intervalo de temperaturas de 27°C hasta 35°C como máximo (a las 17:00 horas).

4.4.2. Febrero



a)



b)

Gráfica 4.3. a). Comportamiento de las temperaturas y radiación solar en el sistema en Febrero. b). Comportamiento de la nubosidad y la velocidad del aire en Febrero.

La Gráfica 4.3 a) muestra los perfiles de temperatura del ambiente, del reactor y del termotanque en el ciclo de 24 horas, además de la radiación solar. Donde se observa que la temperatura del medio ambiente presenta una variación que va desde los 15 °C hasta los 25 °C, mientras que en el reactor es de 30 °C hasta 37 °C y el termotanque presenta valores de 32 °C hasta 75°C y es en el orden de las 9:00 h cuando este alcanza una temperatura superior a los 40 °C, lo cual permite alimentar el serpentín de calentamiento. Durante el periodo de radiación que comprende de las 6:00 h hasta las 18:00 h, se presentó una radiación global de 5.409 Kw-h/m<sup>2</sup> con un valor mínimo de 0.1 Kw/m<sup>2</sup> a las 6:00 h y un máximo de 0.85 Kw/m<sup>2</sup> a las 12:00 h tiempo local, además de obtener un calor disponible en el termotanque de 192162.516 KJ/h.

La Gráfica 4.3 b) muestra el comportamiento de la nubosidad y la velocidad del viento, en la cual se observa que durante la noche no se presentó nubosidad y durante el día se obtuvo un máximo de nubosidad de 55% (12:00 h a 16:00 h), mientras que la velocidad del viento presentó valores que oscilaron alrededor de 1 y 3.3 m/s, en el mismo intervalo de tiempo.

La temperatura en el reactor disminuyó de las 00:00 h hasta las 8:00 h de 29 °C a 26 °C, esto debido a que la temperatura mínima en el ambiente fue de 15 °C al final de ese intervalo de tiempo. Por otro lado a partir de las 03:00 h la velocidad del viento incrementó de 0 a 1 m/s, potencializando así el efecto de la pérdida de calor en el reactor por descenso de la temperatura ambiente, posteriormente a las 09:00 h la temperatura en el medio ambiente comenzó su ascenso gradual desde 15 °C hasta 26 °C a las 16:00 h y a pesar de presentarse una velocidad de viento de 3.3 m/s, la cual es mayor a la de las primeras horas del día se favoreció el incremento en la temperatura del reactor (32 °C-35 °C), esto se debe a que la temperatura del ambiente durante las horas de la tarde incrementa su valor (25 °C), sin embargo a partir de las 20:00 h nuevamente se observa una disminución en la temperatura del reactor

alcanzando 26 °C, esto por efecto de pérdidas al medio ambiente, ya que la temperatura ambiente disminuye hasta 20 °C.

A partir de las 9:00 h observó una nubosidad del 20%, sin embargo, esta no afectó de manera representativa a la radiación solar, debido a que durante la misma hora se incrementó de 0 Kw/m<sup>2</sup> a un valor de 0.08 Kw/m<sup>2</sup>, para posteriormente alcanzar un máximo de 0.82 Kw/m<sup>2</sup> a las 13:00 h, mientras que la temperatura del termotanque comienza a incrementar alcanzando un máximo de 77 °C a las 12:00 h, sin embargo el termotanque no alcanza la temperatura más elevada a la misma hora que la radiación solar llega a su valor máximo debido a que el reactor está consumiendo agua de calentamiento, además la radiación solar se ve impactada debido a que durante las horas del día con mayor radiación solar la nubosidad alcanza un 55%.

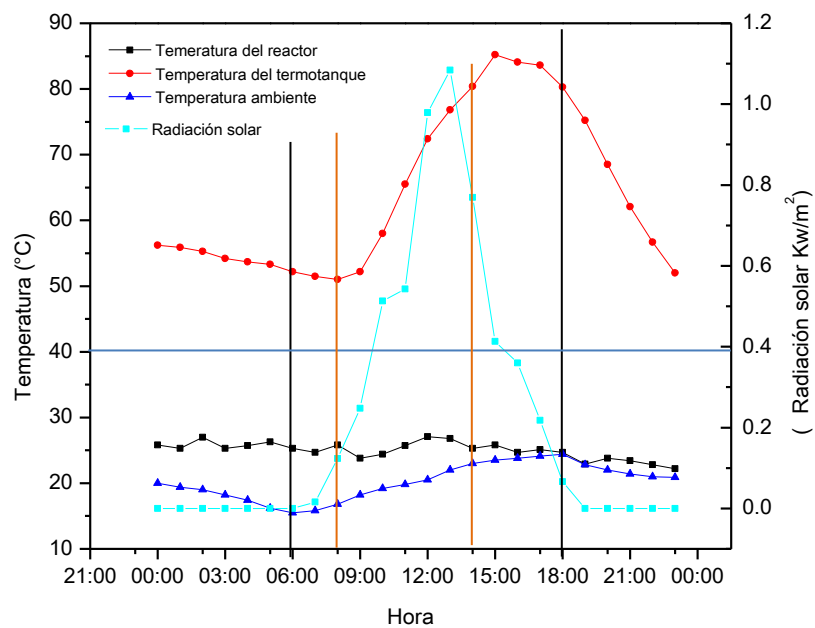
La temperatura del reactor y el termotanque comenzaron a incrementar a las 10:00 h, alcanzando 35°C y 75°C, respectivamente a las 12:00 horas, sin embargo la temperatura del reactor no logró mantenerse, disminuyendo hasta los 32°C a las 15:00 h, lo cual puede atribuirse a un incremento en la velocidad del viento en conjunto a la alimentación de agua fría y salida de agua caliente del reactor, sin embargo al cabo de dos horas el reactor recupera su temperatura (35°C). Por otro lado a las 21:00 h la temperatura ambiente decrece a 22°C y comienza a ser representativo el efecto sobre el reactor en conjunto con la velocidad del viento y la temperatura del termotanque, en el caso de ésta última, a pesar de presentar un valor suficiente para circular agua por el serpentín de calentamiento, la delta de temperatura es pequeña (14°C) lo que hace más lenta la transferencia de calor.

Finalmente se observa que a pesar de la existencia de cierta influencia en la temperatura del reactor por la alimentación de agua fría, la temperatura

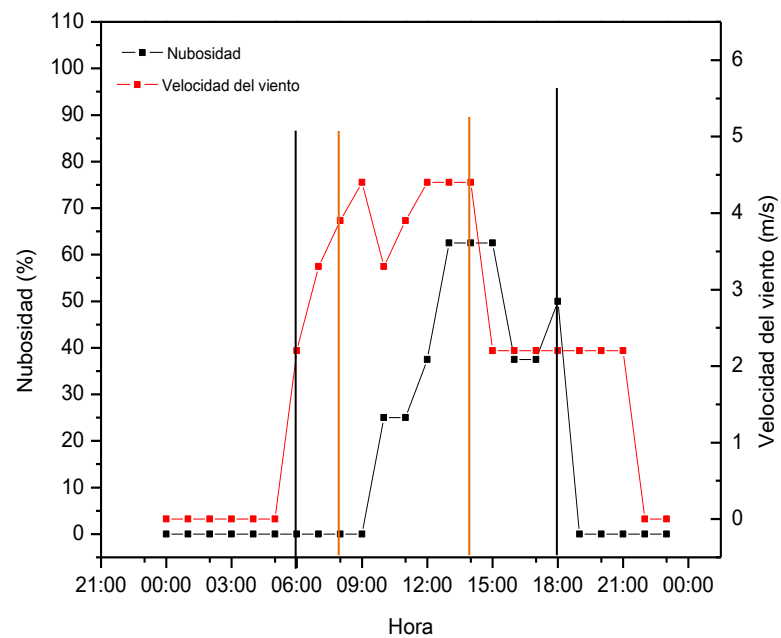
ambiente y la radiación solar tienen un impacto mayor en el sistema, seguido de la velocidad del viento y nubosidad.

Por otra parte la temperatura del reactor durante el mes de Febrero no logra mantenerse constante, con estas condiciones ambientales, sin embargo, el valor mínimo que presenta es de 30 °C durante tres cuartas partes del día y 35 °C el resto del tiempo.

## 4.4.3. Marzo



a)



b)

Gráfica 4.4 a). Comportamiento de las temperaturas y radiación solar en el sistema en Marzo. b). Comportamiento de la nubosidad y la velocidad del aire en Marzo.

En la Gráfica 4.4 a) se observa el perfil de las temperaturas del medio ambiente, del reactor, del termotanque y la radiación solar. Donde se muestra que la temperatura del medio ambiente se encontró en un intervalo de 15 °C a 25 °C, la temperatura del reactor entre 20 °C y 27 °C, además el termotanque presentó una temperatura mínima de 50 °C y una máxima de 85 °C debido a que el valor global de la radiación solar fue de 5.332 Kw-h/m<sup>2</sup> con un máximo de 1.08 Kw/m<sup>2</sup> a las 12:00 del día, con un calor disponible en el termotanque de 372269.352 KJ/h.

En la Gráfica 4.4 b) se presentan los perfiles de la nubosidad y de la velocidad del viento, en la cual se muestra que el porcentaje de nubosidad máximo fue de 65 % (13:00 h-15:00 h), durante las horas de mayor radiación, mientras que la velocidad máxima del viento fue de 4.5 m/s (09:00 h-14:00 h).

Durante las primeras horas del día (00:00 h-06:00 h) la temperatura ambiente comenzó a descender de 20°C a 15°C, sin embargo la temperatura del reactor no se vio afectada significativamente ya que mantiene su valor en 25°C, esto es debido a que la velocidad del viento durante este periodo fue nula, por otra parte a las 08:00 h comenzó el ascenso de la temperatura en el ambiente y de igual manera de la velocidad del viento, sin embargo la temperatura del reactor se mantuvo en 26 °C, lo cual se debe a la velocidad del viento ya que durante ese periodo de tiempo alcanzó su valor máximo (4.5 m/s), mientras que a las 20:00 h la temperatura del medio ambiente comenzó a decrecer hasta alcanzar 21°C a las 23:00 horas y a pesar de esto la temperatura del reactor se mantuvo en 25°C, lo que indica que a velocidades de viento superiores a las 2 m/s con temperaturas ambiente que oscilan entre los 20°C y los 23°C, la temperatura en el reactor no alcanzará los 35°C, pese a tener agua de calentamiento disponible .

Se observa una ligera afectación de la adición de entrada de agua fría y salida de agua caliente por efecto de la alimentación al reactor, a las 09:00 horas la temperatura del reactor disminuye de 25°C a 23°C, sin embargo se recuperó a las 10:00 am.

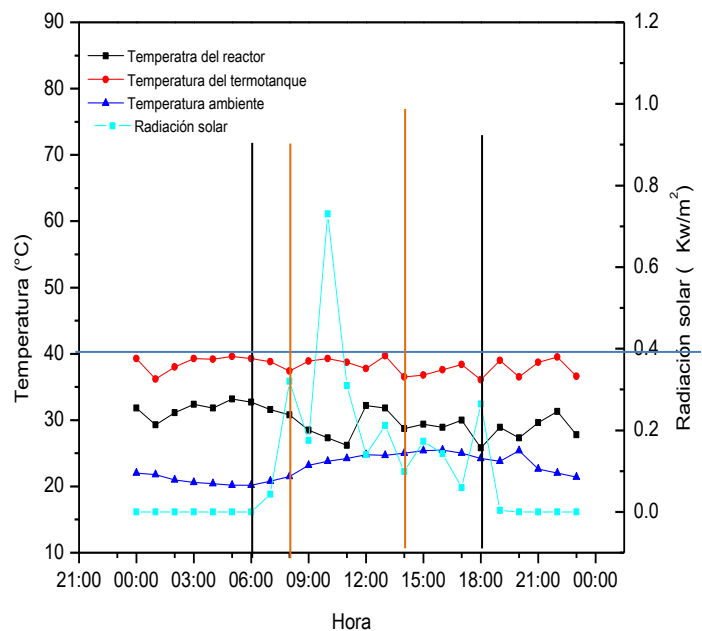
Con respecto a la radiación solar, esta comenzó a presentarse a partir de las 7:00 horas, mostrando una tendencia a incrementar, alcanzando el valor máximo de  $1.1 \text{ Kw/m}^2$  a las 13:00 horas, durante esta misma hora la nubosidad también incrementó alcanzando un 60%, lo que, afectó significativamente la radiación solar disminuyendo a  $0.4 \text{ Kw/m}^2$  a las 15:00 h.

Por otra parte la temperatura en el termotanque disminuye de  $55^\circ\text{C}$  a  $51^\circ\text{C}$  en el periodo de las 00:00 h a 08:00 h, la cual es una temperatura superior a la requerida por el sistema de control, sin embargo el reactor no alcanza los  $30^\circ\text{C}$ , debido a que como se mencionó anteriormente la velocidad del viento fue durante la mañana.

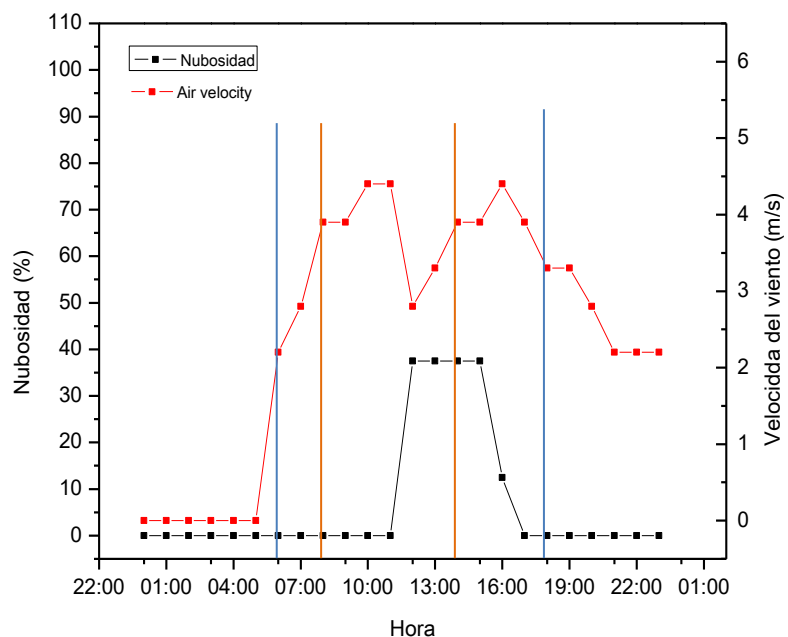
Se presentó un retardo en el incremento de la temperatura en el termotanque, ya que, llegó a un valor máximo ( $85^\circ\text{C}$ ) a las 16:00 horas (2 horas después de presentarse la radiación mayor), sin embargo se observa una relación más estrecha con la temperatura ambiente debido a que durante esta hora esta se encontró en  $23^\circ\text{C}$  (valor más alto).

Durante el mes de marzo resulta complicado mantener las condiciones de temperatura controlada a  $35^\circ\text{C}$  dentro del reactor, ya que, a pesar de que la radiación solar es alta y la temperatura del termotanque presenta valores elevados, el reactor no logra mantenerse en la temperatura deseada, debido a la velocidad del viento que es alta y la temperatura del medio en baja.

## 4.4.4. Abril



a)



b)

Gráfica 4.5 a). Comportamiento de las temperaturas y radiación solar en el sistema en Abril. b). Comportamiento de la nubosidad y la velocidad del aire en Abril.

En la gráfica 4.5 a) se observa el comportamiento de las temperaturas del ambiente, del termotanque, del calentador solar, del reactor y el perfil de la radiación solar, durante un periodo de 24 h, en la cual se muestra que la temperatura ambiente presenta un valor mínimo de 20 °C y un máximo de 25 °C, sin embargo la radiación solar global es de 2.671 Kw-h/m<sup>2</sup> con un máximo de 0.75 Kw/m<sup>2</sup>, se presentaron cifras menores a las de los meses anteriores, lo que afectó la temperatura del termotanque ya que, no presentó valores adecuados para que el sistema de calentamiento funcionara, y durante las 24 h se encontró por debajo de los 40 °C, debido a las altas velocidades del viento y a las temperaturas bajas en el medio ambiente.

En la gráfica 4.5 b) se presentan los perfiles de la nubosidad y velocidad del viento, en este caso la velocidad del viento fue alta, presentando picos máximos de 4.5 m/s en el periodo de las 10:00 h a las 16:00 h, mientras que la nubosidad (35%) fue menor con respecto a los meses anteriores y únicamente se tuvo en el periodo de las 12:00 h a las 16:00 h.

En las primeras horas del día (00:00 h a 07:00 h) la temperatura ambiente desciende 2 °C, llegando a los 20 °C, sin embargo esto no afectó la temperatura del reactor (29 °C- 31 °C), pero a partir de las 08:00 h la temperatura del ambiente comienza a incrementar hasta alcanzar 25 °C a las 15:00 h y por otro lado el reactor comienza a disminuir su temperatura hasta alcanzar 25 °C a las 11:00 h debido a la velocidad del viento (2.5 m/s) y posteriormente a las 12:00 h incrementa su temperatura a 30 °C y se mantiene variando 3 °C durante el resto del día, este incremento es debido a que la temperatura en el medio ambiente es considerablemente elevada para la ciudad Morelia (30 °C).

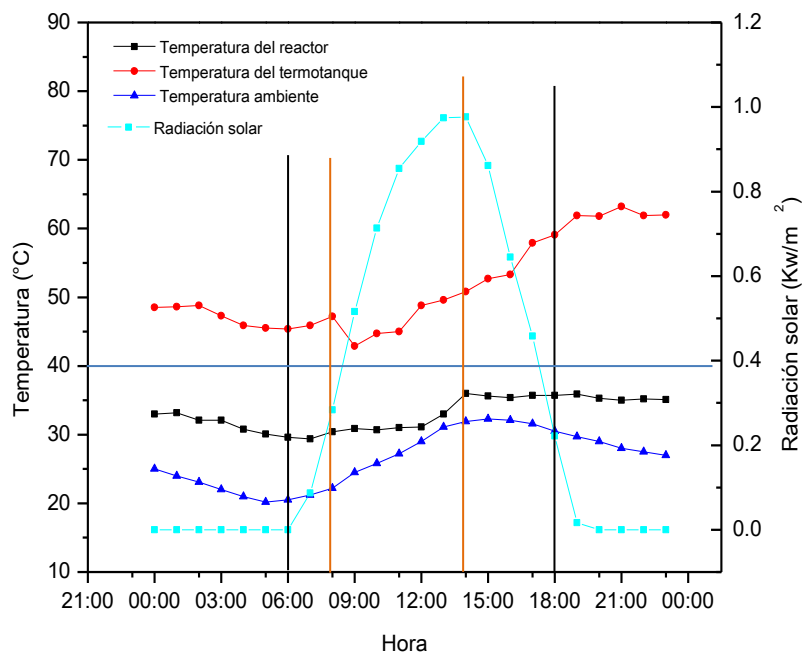
A las 7:00 horas la radiación solar incrementa de 0 a 0.31 Kw/m<sup>2</sup>, debido a la salida del sol, posteriormente a las 10:00 am se alcanza el valor mayor, el cual fue de 0.74 Kw/m<sup>2</sup>, esto se debe a que durante las horas en las cuales generalmente se alcanza la radiación solar máxima, se presentó una nubosidad del 35 %, contrario al resto del día que fue del 0%, debido a la velocidad del viento alta durante casi la mayor parte del tiempo.

Por otro lado a las 06:00 h la temperatura del reactor comienza a disminuir de 30°C hasta un valor mínimo de 25°C a las 11:00 horas, lo cual se puede atribuir a la radiación solar baja, en conjunto con velocidades de viento altas (2-4.5 m/s), además del efecto de enfriamiento en el reactor por la entrada de agua fría y salida de agua caliente durante la alimentación.

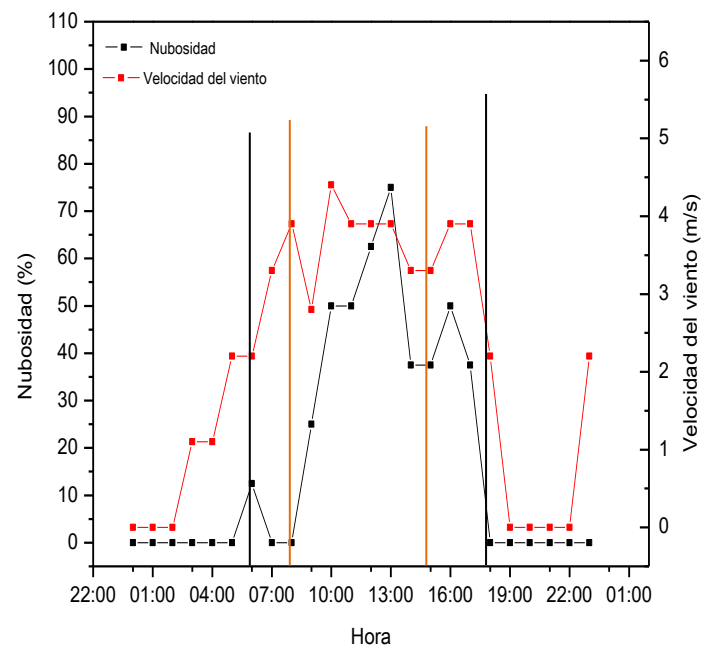
Dentro del termotanque el agua no alcanzó la temperatura necesaria para que el agua caliente comience a entrar al sistema ya que, durante todo el día se encuentra por debajo de los 40°C.

Finalmente se observa que bajo estas condiciones, el reactor no puede mantenerse a una temperatura constante de 35°C, sin embargo se mantiene entre 25°C y 32°C debido a que la temperatura del ambiente se encontró entre los 20 y 25°C durante todo el día, evitando un enfriamiento considerable en el sistema. El efecto de alimentación de agua fría, se potencializó durante las primeras horas de alimentación (8:00-11:00 am), cuando las condiciones anteriormente mencionadas no fueron favorables.

4.4.5. Mayo



a)



b)

Gráfica 4.6. a). Comportamiento de las temperaturas y radiación solar en el sistema del día en Mayo. b). Comportamiento de la nubosidad y la velocidad del aire del día en Mayo.

En la gráfica 4.6 a) se observa el comportamiento de la temperatura del reactor, del termotanque, del ambiente y de la radiación solar, mostrando que la radiación solar global es de  $7.526 \text{ Kw-h/m}^2$  con un máximo de  $1 \text{ Kw/m}^2$  a las 14:00 h, lo que originó un calor disponible en el termotanque de  $297,235.303 \text{ KJ/h}$ , mismo que durante todo el día presenta una temperatura adecuada para el funcionamiento del sistema de calentamiento ( $42\text{-}63^\circ\text{C}$ ), además la temperatura del reactor se encuentra en un mínimo de  $30^\circ\text{C}$  y una máxima de  $35^\circ\text{C}$ , mientras que la temperatura del medio ambiente incrementa con respecto a los meses anteriores, ya que presenta una temperatura mínima de  $20^\circ\text{C}$  y máxima de  $32^\circ\text{C}$ , cabe mencionar que es una de las temperaturas más altas registradas en Morelia durante el año.

En la gráfica 4.6 b) se muestra el comportamiento de la nubosidad y de la velocidad del viento, dichos parámetros presentaron un mínimo y un máximo de  $0\%$  y  $75\%$  y  $0 \text{ m/s}$  y  $4.5 \text{ m/s}$ , respectivamente, sin embargo se observó que ambos son muy variables durante este mes.

Durante las primeras horas del día ( $00:00 \text{ h}$  a  $01:00 \text{ h}$ ) la temperatura del reactor se encontró cerca del valor deseado ( $33^\circ\text{C}$ ), posteriormente a partir de las  $01:00 \text{ h}$  comenzó a descender y presentó a las  $6:00 \text{ h}$  una temperatura de  $30^\circ\text{C}$ . Durante este tiempo el colector solar alcanzó una temperatura de  $49^\circ\text{C}$  la cual a las  $02:00 \text{ h}$  descendió a  $45^\circ\text{C}$ . Esto se debe a un descenso en la temperatura ambiente, la cual en el periodo de  $12:00$  a  $05:00$  horas fue de  $25^\circ\text{C}$  a  $20^\circ\text{C}$  y por otro lado en ese mismo periodo de tiempo la velocidad del viento incrementó alcanzando  $2.2 \text{ m/s}$ , además de que el reactor comenzó a requerir agua caliente.

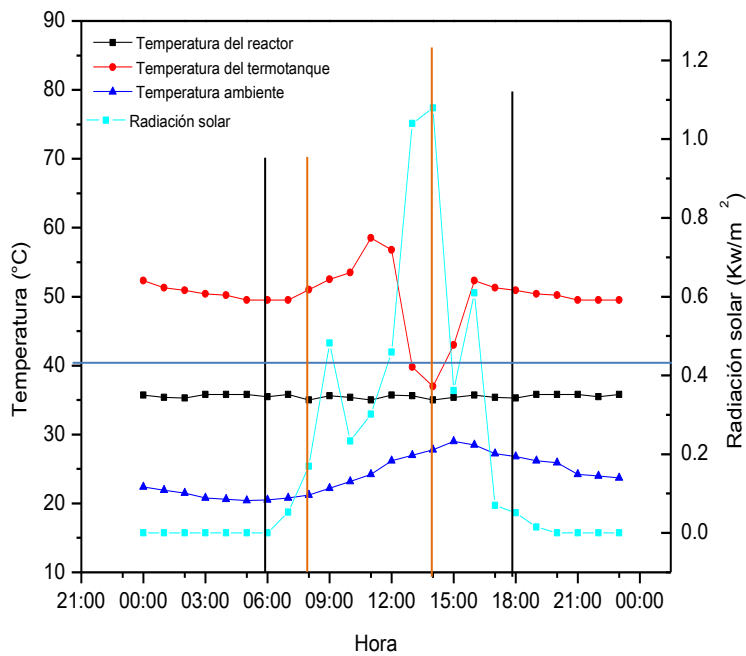
Por otra parte a las  $7:00$  horas, la radiación solar presentó un valor de  $0.1 \text{ Kw/m}^2$  y continúa incrementando a lo largo del día hasta alcanzar un valor máximo de  $1 \text{ Kw/m}^2$  a las  $14:00$  cuando la nubosidad disminuye su valor a  $35\%$ , de igual forma la temperatura del ambiente comenzó a aumentar, presentando un valor de  $30^\circ\text{C}$  a la misma hora, mientras el reactor alcanzó los  $35^\circ\text{C}$  y se mantuvo así el resto del día.

A pesar de que la temperatura ambiente disminuyó hasta los 25°C a las 24:00 horas y de igual forma la velocidad del viento fue elevándose durante el día alcanzando valores de 4.5 m/s, no se obtuvo un efecto significativo en la temperatura del reactor y del termotanque, debido a que la temperatura del ambiente es alta (25°C).

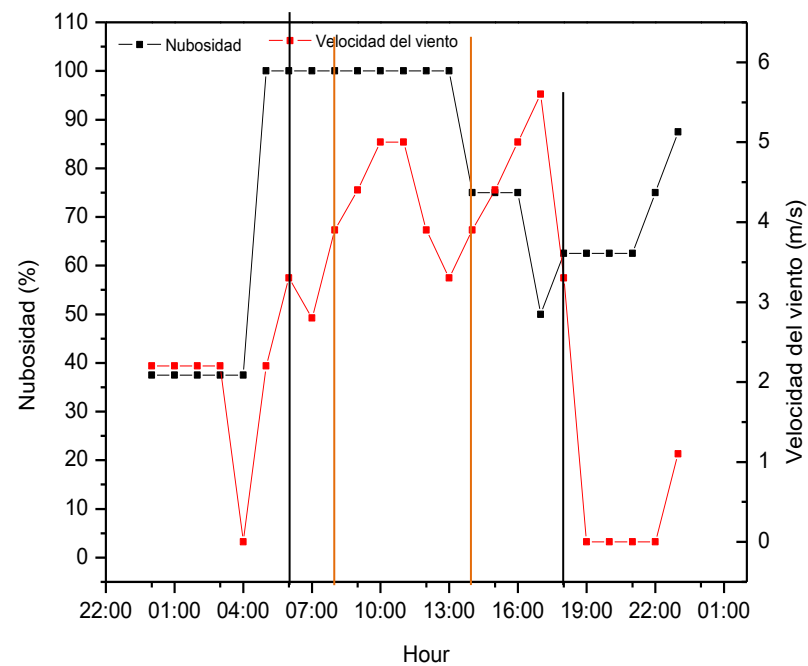
El efecto de la alimentación del agua fría al reactor y desplazamiento de agua caliente no fue observable en este caso.

Durante el mes de mayo se presentaron condiciones ambientales adecuadas para que el reactor mantenga la temperatura en 35 °C la mayor parte del día, y que el resto del día se encontrara sobre 30°C. Lo que indica que es un mes adecuado para la implementación del sistema de calentamiento solar en un reactor anaerobio.

## 4.4.6. Junio



a)



b)

Gráfica 4.7. a). Comportamiento de las temperaturas y radiación solar en el sistema en Junio. b). Comportamiento de la nubosidad y la velocidad del aire en Junio.

En la gráfica 4.7 a) se muestra el comportamiento de la temperatura del medio ambiente, del reactor, del termotanque y de la radiación solar, observando que la temperatura ambiente presenta valores menores que el mes anterior ( $20^{\circ}\text{C}$ - $27^{\circ}\text{C}$ ), y el reactor se mantiene en la temperatura deseada ( $35^{\circ}\text{C}$ ), por otro lado el termotanque se mantiene durante la mayoría del día sobre los  $40^{\circ}\text{C}$ , sin embargo la radiación solar global fue de  $4.925\text{ Kw}\cdot\text{h}/\text{m}^2$  y presentó un valor máximo de  $1.1\text{ Kw}/\text{m}^2$  a las 14:00 h, lo cual generó un calor disponible en el termotanque de  $294,208.824\text{ KJ}/\text{h}$ .

En la gráfica 4.7 b) se observan los perfiles del comportamiento de la nubosidad y de la velocidad del viento, los cuales muestra que, la nubosidad fue alta y presentó un valor mínimo de 37% y un máximo del 100%, por otra parte la velocidad del viento se encontró entre  $0\text{ m}/\text{s}$  y  $5.5\text{ m}/\text{s}$ .

Durante el intervalo de las 00:00 h a las 6:00 h la temperatura del ambiente comenzó a disminuir, de  $25^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$  y de igual forma sucede con la temperatura del termotanque que decrece de  $55^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ , esto se debe a que la velocidad del viento comenzó a incrementarse alcanzando los  $3.3\text{ m}/\text{s}$  a las 6:00 h, sin embargo la temperatura del reactor no se ve afectada, manteniéndose en  $35^{\circ}\text{C}$  con ligeras variaciones de  $\pm 1-1.5^{\circ}\text{C}$ .

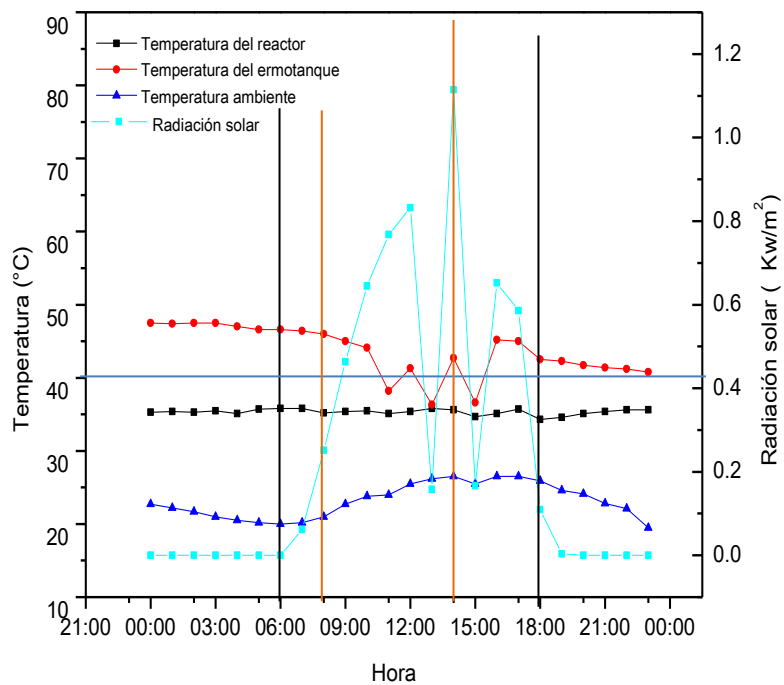
Posteriormente con la salida del sol, la radiación solar comenzó a incrementar alcanzando un máximo de  $1.1\text{ Kw}/\text{m}^2$  a las 14:00 h. Por otro lado la temperatura ambiente alcanzó su punto máximo a las 15:00 horas, mostrando un desplazamiento de una hora con respecto a la radiación solar. Por otra parte a las 14:00 horas comenzó un descenso en la temperatura del termotanque, esto se debe a un desplazamiento de agua en el calentador solar, debido a que el agua caliente no es necesaria y se alcanzan altas temperaturas dentro del termotanque, por lo tanto la presión incrementa y arroja agua caliente, lo cual, coincide con los puntos más elevados de temperatura ambiente y de radiación solar, sin embargo a las 16:00 horas la temperatura en el termotanque se recuperó ( $52^{\circ}\text{C}$ ).

Se observa en la gráfica 4.7 b) que durante las horas de mayor radiación solar la nubosidad desciende de 100% a 75%, presentando uno de los valores más altos durante el año, a pesar de que la velocidad del viento se mantuvo sobre 2.3 m/s, alcanzando valores de 5.5 m/s, la nubosidad se mantuvo elevada y por otra parte la temperatura del reactor y del termotanque tampoco se afectaron, debido a que la temperatura del viento fue alta (20°C- 25°C).

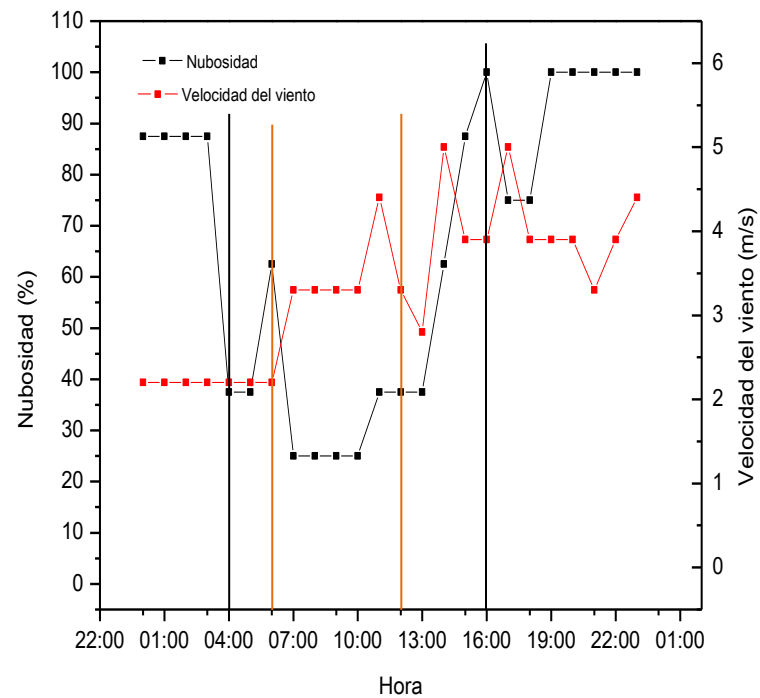
Por otra parte se observa que la entrada de agua fría y salida de agua caliente, no tienen efecto significativo en el sistema, lo que implica que existen variables con mayor influencia en el enfriamiento del reactor.

Durante este mes se presentan las condiciones adecuadas para mantener la temperatura en el reactor estable (35°C). Pese a las altas velocidades de viento, las cuales no tienen efecto significativo debido a que la temperatura del ambiente fue alta (durante la mayor parte del día fue mayor a 25°C).

4.4.7. Julio



a)



b)

Gráfica 4.8 a). Comportamiento de las temperaturas y radiación solar en el sistema en Julio. b). Comportamiento de la nubosidad y la velocidad del aire en Julio.

En la Gráfica 4.8 a) se muestra el perfil de temperaturas del ambiente, del termotanque, del reactor y la radiación solar, observándose que el reactor se mantiene en 35 °C, y el termotanque presenta temperatura suficiente para que el sistema de calentamiento funcione (sobre 40 °C), la radiación solar global fue de 5.81 Kw-h/m<sup>2</sup> y presentó un valor máximo de 1.1 Kw/m<sup>2</sup> a las 14:00 h, lo cual ocasionó un calor disponible en el calentador solar de 356,233.432 KJ/h.

La Gráfica 4.8 b) muestra los perfiles de nubosidad y velocidad del viento los cuales presentan valores muy variables, alcanzando máximos de 100% y 5.5 m/s, respectivamente.

La temperatura del reactor se mantuvo en 35°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ), a pesar de que la temperatura ambiente disminuyó durante las primeras horas de 23°C a 20°C y por otro lado también se observó un ligero decremento en la temperatura del termotanque de 47°C a 45°C, lo que se puede atribuir al enfriamiento por el medio ambiente.

A partir de las 7:00 horas la temperatura ambiente comenzó a incrementar hasta alcanzar los 25°C aproximadamente a las 14:00 horas, por otra parte durante esta hora la radiación solar alcanzó 1.2 Kw/m<sup>2</sup> (valor máximo), sin embargo a lo largo del día existe variación en la radiación solar, lo cual afecta la temperatura del termotanque y la temperatura ambiente ya que el termotanque desfogó agua caliente, provocando una disminución en su temperatura, sin embargo a las 16:00 horas el termotanque recuperó la temperatura (45°C), al finalizar el día se observa que las variaciones de temperatura, nubosidad y velocidad del viento no afectan la temperatura del termotanque, así como tampoco lo hace la alimentación de agua fría al sistema.

Se observan condiciones ideales durante este mes para mantener la temperatura de 35°C dentro del reactor, lo cual indica que la energía solar es una fuente energética capaz de conservar por sí sola la temperatura de un reactor anaerobio, durante algunos meses del año. Sin embargo a pesar de las grandes ventajas que ofrece la energía solar, su integración debe enfrentarse al uso de fuentes de energía convencionales las cuales son empleadas generalmente en las industrias, lo que provoca una disminución en la explotación de la energía solar, por lo tanto es necesario realizar estudios en los

cuales se incluyan factores asociados como; nubosidad, intensidad de la radiación solar y las estaciones del año (Suehrcke *et al.*, 2013), elementos clave para demostrar las ventajas de la energía solar (Dumas *et al.*, 2015).

# Capítulo V

# Conclusiones

### Conclusiones

Es posible mantener la temperatura en el reactor anaerobio en 35°C solo en una parte del año, especialmente en los meses denominados calurosos (Mayo, Junio y Julio).

Para el proceso de anaerobiosis, en los meses denominados fríos (Enero, Febrero, Marzo y Abril) aun y cuando no se alcanza la temperatura de 35 °C, se tiene una mínima de 30 °C, la cual es todavía aceptable para el proceso de anaerobiosis.

En los meses calurosos, además de alcanzar la temperatura de 35 °C, se tiene una energía remanente dentro del captador solar.

Dada la variabilidad de las condiciones climatológicas se logra a través del sistema propuesto mantener la temperatura en el rango mesofílico.

Condiciones extremas de velocidad de viento y bajas temperaturas en el ambiente impiden alcanzar la temperatura de 35 °C dentro del reactor.

# Recomendaciones

### Recomendaciones

Con base a los resultados obtenidos se hacen las siguientes recomendaciones para una etapa posterior del proyecto de investigación:

1. Alimentar el reactor anaerobio con agua residual y colocar lodos anaerobios.
2. Monitorear la producción de biogás.
3. Contemplar la temperatura del viento en los cálculos
4. Revisar posibles interferencias debidas al cableado en el sistema de monitoreo de datos.
5. Proteger la bomba de alimentación al reactor.
6. Evitar conectar el sistema a un lugar donde se presenten variaciones frecuentes y representativas de voltaje.
7. Realizar una segunda etapa con agua residual y evaluar el comportamiento.

## Bibliografía

- **Ammary Y. B. 2004.**, “Nutrients requirements in biological industrial wastewater treatment”, African Journal of Biotechnology. 3:4, pp. 236-238.
- **Angelidaki I., Treu L., Tsapekos P., Luo G., Campanaro S., Wenzel H., Kouglas P., 2018**, Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. Biotechnology Advances. 36:452-466.
- **Bermúdez R C., Rodríguez Suyén, de la C. Martínez M., Terry A. I., 2010**, “Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogás”. Centro de Estudios de Biotecnología Industrial, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.
- **Bodkhe S.Y., 2009**, “A modified anaerobic baffled reactor for municipal wastewater treatment”. Journal of Environmental Management. 90, 2488-2493.
- **Bustillo-Lecompte C., Mehrvar M., 2015**, Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in meat processing industry: a review on trends and advances. J Environ Manag 161(1):287–302.
- **Bustillo-Lecompte C., Mehrvar M., 2016**, Treatment of an actual slaughterhouse wastewater by integration of biological and advanced oxidation processes: modeling, optimization and cost effectiveness analysis. J Environ Manag 182:651–666.
- **Bustillo-Lecompte C., Mehrvar M., 2017**, Treatment of actual slaughterhouse wastewater by combined anaerobic-aerobic processes for biogas generation and removal of organics and nutrients: An optimization study towards a cleaner production in the meat processing industry. Journal of Cleaner Production 141: 278-289.
- **Caicedo, M. F., y Marín A., J., 2006**, “Diseño, construcción y arranque de un reactor UASB piloto para el tratamiento de lixiviados”, Tesis de especialidad (Especialización en Ingeniería Ambiental). Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia, 2:3 49 pp.
- **Cardozo V., Fernández F., Duarte J., 2005**, “Diseño y construcción de un calentador solar didáctico”. Revista Colombiana de física. 37:2, 338- 348.

- **Castillo R. F., 2005**, “Biotecnología Ambiental”, segunda edición, Editorial Térbar, S. L., Madrid, España, capítulo 2, 21-23.
- **Cheng H., Hu Y., 2013**. “Water pollution during China’s industrial transition”, *Environmental Development*, 8, 57-73.
- **Del Nery V., Damianovic M., Moura R., Pozzi E., Pires E., Foresti E., 2016**, Poultry slaughterhouse wastewater treatment plant for high effluent. *Water Sci Technol* 73(2):309–316.
- **Feng Q., Yu A., Chu L., Chen H., Xin H., 2012**. “Mechanistic study of on-site sludge reduction in a baffled bioreactor consisting of three series of alternating aerobic and anaerobic compartments”. *Biochemical Engineering Journal*, 67, 45-51.
- **Feng R., Li J., Dong T., Li X., 2016**, Performance of a novel household solar heating thermostatic biogas system. *Applied Thermal Engineering*. (96) 519-526.
- **Gray N. F., 2010**. “Water Technology”, An Introduction for Environmental Scientists and Engineers, Tercera edición, Editorial McGraw Hill, Dublin, Capítulo 3, 220.
- **Gutiérrez A., Seghezzo L., Trupiano A., Cuevas C., 2001**. “Efecto de la descarga de lodo y el tiempo de retención hidráulico en la remoción de sólidos suspendidos en un reactor UASB”, *Avances en Energías renovables y Medio Ambiente.*, 5, 50-57.
- **Gutiérrez G. G de J., I. Moncada F., Meza M. M. M., Félix F. A., Balderas C. J. de J., Gortáres M. P., 2012**, “Biogás: una alternativa ecológica para la producción de energía”, *Ideas CONCYTEG*, 7(85), 881-894.
- **Hassanein A., Qiu L., Junting P., Yihong G., Witarsa F., Hassanain A., 2015**, Simulation and validation of model for heating underground biogas digesters by solar energy. *Ecological Engineering*. (82) 336-344.
- **International Energy Agency. 2010**, Technology Roadmap, Concentrating Solar Power. OECD/IEA, París, Francia.
- **International Energy Agency. 2011**, Renewable Energy technologies, Solar Energy Perspectives. OECD/IEA. París, Francia.

- **Jamar A., Mjid Z., Azmi W., Norhafana M., Razak A., 2016**, A review of water heating system for solar energy applications. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 76: 178-187.
- **Jun-Yuan J., Kai Z., Ya-juan X., Ping Z., 2012**, “Hydraulic characteristics and their effects on working performance of compartmentalized anaerobic reactor”, *Bioresource Technology*. 116, 47-52.
- **Langenhoff A., Stuckey D., 2000**, “Treatment of dilute wastewater using an anaerobic baffled reactor effect of low temperature”, *Water Resource*. 34:15, 3867-3875.
- **Lin Y., Han X., Lu H., Zhou J., 2013**, “Study of archea community structure during the biodegradation process of nitrobenzene wastewater in an anaerobic baffled reactor”, *International Biodeterioration & Biodegradation*. 85, 499-505.
- **Lindkvist E., Karlsson M., 2018**, Biogas production plants; existing classifications and proposed categories, *Journal of Cleaner Production*. 174: 1588-1597.
- **Liu Y., Kang X., Li X., Yuan Y., 2015**, Performance of aerobic granular sludge in a sequencing batch bioreactor for slaughterhouse wastewater treatment. *Biores Technol* 190(1):487–491.
- **Manahan E. S., 2007**, “Introducción a la Química Ambiental”, Primera edición. Editorial Reverté UNAM, capítulo 3, 190-193.
- **Mallick P., Akunna J.C., Walker G.M., 2010**, “Anaerobic digestion of distillery spent wash: Influence of enzymatic pre-treatment of intact yeast cells”, *Bioresource Technology*. 101, 1681-1685.
- **Mayagoitia H., 2007** “Energías alternativas y cambio climático”, Instituto Politécnico Nacional. Programa ambiental.
- **Menardo S., Gioelli F., Balsari P., 2011**, “The methane yield of digestate: effect of organic loading rate, hydraulic retention time and plant feeding”, *Bioresource technology*, 102, 2348-2351.
- **Metcalf y Eddy., 2003**, “Wastewater Engineering Treatment and Reuse”, cuarta edición, Editorial McGraw Hill, New York, capítulo 2, 104.

- **Meyer A., Ehimen E., Nielsen J., 2018**, Future European biogas: Animal manure, straw and grass potentials for a sustainable European biogas production. *Biomass and Bioenergy*. 111: 154-164.
- **Nieto G., Gónzales T. D., Bello R., 2005**, “Morfología y estructura microbiana de biogránulos de reactores anaerobios UASB”, Colegio de la frontera Sur, Tapachula, Chiapas.
- **Osorio S. J., Ciro V.H., González S. H., 2007**, “Evaluación de un sistema de biodigestión en serie para clima frío”, *Fac. Nal. Agr. Medellín*. 60:2, 4145-4162.
- **Pacheco J., Magaña A. 2003**. “Arranque de un reactor anaerobio”, *Ingeniería Revista Académica*. 7-1, pp, 21-25.
- **Rajab A., Salim R., Sohaili R., Anuar A., Krishna S., 2016**, Performance of integrated anerobic/aerobic sequencing batch reactor treating poultry slaughterhouse wastewater.
- **Ramalho, R., 2003**, “Tratamiento de aguas residuales”. Tercera edición, Editorial Reverté, Capítulo 4 503-521.
- **Rasi S., Veijanen A., Rintala J., 2006**, “Trace compounds of biogas from different biogas plants”, *Energy*. 32:8, 1375-1380.
- **Sarathai Y., Koottatep T., Morel A., 2010**, “Hydraulic characteristics of an anaerobic baffled reactor as onsite wastewater treatment system”, *Journal of Environmental Sciences*. 22:9, 1319-1326.
- **Sheng H. J., 1986**, “Solar Energy Engineering”, Primera edición, Editorial Prenticce-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, Capítulo 2, 10-27.
- **Sponza D. T., 2001**, “Anaerobic granule formation and tetrachloroethylene (TCE) removal in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor”, *Enzyme and Microbial Technology*. 29:6-7, 417-427.
- **Sun W., Lam K., Li X., 2018**, Effect of the shape change on the mass transport of bio-flocs in water, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 544: 144-151.
- **Taki M., Ajabshirchi Y., Ranjbar S., Rohani A., Matloobi M., 2016**, Heat transfer and MLP neural network models to predict inside environment variables

and energy lost in a semi-solar greenhouse. *Energy and Buildings*. 110: 314-329.

- **Tchobanoglous, G., Theisen, H. y Vigil, S. 1994.** “Gestión integral de residuos sólidos”, Ed. McGraw-Hill, México, 2:5 1087 pp.
- **Terreros, J., Olmos, A., Noyola, A., Ramírez, F., Monroy, O., 2009,** “Digestión anaerobia de lodo primario y secundario en dos reactores UASB en serie”, *Revista mexicana de ingeniería química*. 8: 2, 153-161.
- **Tippayawong N., Thanompongchart P., 2010,** “Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S in a packed column reactor”, *Energy*, 35, 4531-4535.
- **Vidal J., Huilínir C., Salazar R., 2016,** Removal of organic matter contained in slaughterhouse wastewater using a combination of anaerobic digestion and solar photoelectron-Fenton processes. *Electrochim Acta* 210:163–170.
- **Wang C., Lu Y., Hong F., Li X., Zeng X., Lu H., 2017,** Two-Phase Anaerobic Digester Combined with Solar Thermal and Phase Change Thermal Storage System in Winter. *Energy & Fuels*. 31: 4003- 4012
- **Wang J., Huang Y., Zhao X., 2004,** “Performance and characteristics of an anaerobic baffled reactor”, *Bioresource Technology*, 93, 205-208.
- **Winkler M. A., 2008,** “Tratamiento biológico de aguas de desecho”, Segunda edición, Editorial Limusa. México, DF, Capítulo 3, 202-205.
- **Wei-Kang Q., Toshimasa H., Yu-You L., 2013,** “Hydraulic characteristics simulation of an innovative self-agitation anaerobic baffled reactor (SA-ABR)”, *Bioresource Technology*. 136, 94-101.
- **Yiannopoulos A., Manariotis I., Chrysikopoulos C., 2008,** “Design and analysis of a solar reactor for anaerobic wastewater treatment”, *Bioresource Technology*, 99, 7742-7749.
- **Yiannopoulos Q. Manariotis I., Chrysikopoulos C., 2012,** “Assessment of the Effectiveness of a Solar System Heating an Anaerobic Bioreactor”, *Water Air Soil Pollut*, 223, 1443-1454.
- **Yuan S., Rui T., Hong X., 2011,** “Research and Analysis of solar Heating Biogas Fermentation System”, *Procedia Environmental Sciences*. 120, 1386-1391.

- **Zhenjie R., Zhili C., Hou L., Wang W., Xiong K., Xiao X., Zhang W., 2012,** “Design investigation of a solar energy heating system for anaerobic sewage treatment”, *Energy Procedia*, 14, 255-259.

# Anexo

## A1. Diseño del serpentín de cobre

## Consideraciones

El reactor es un recipiente cerrado herméticamente en cuyo interior se tienen fluidos corrosivos y éste se encuentra enchaquetado con dos pulgadas de fibra de vidrio, para evitar el contacto directo con el medio ambiente e impedir pérdidas de calor.

**Tabla 1. Medidas del serpentín**

	Medida (m)
Diámetro externo	0.009525
Diámetro interno	0.007938
Longitud	7

La tabla 1 muestra las medidas propuestas para el diseño del serpentín de cobre. Análisis de la transferencia de calor del lado interno del tubo.

En la tabla 2 se observan las propiedades del agua que fluye por el serpentín; suponiendo una temperatura promedio de entrada igual a 45°C y flujo másico 0.3272 Kg/s.

**Tabla 2. Propiedades del agua a 45°C**

<b>Propiedades de Agua a <math>T_{in}= 45^{\circ}\text{C}</math></b>	
Propiedad	Valor
Conductividad térmica (W/m*K)	637.78E-03
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	990
Calor específico (KJ/Kg*K)	4.180
Viscosidad dinámica (Kg/s*m)	5.94E-04
Coefficiente de expansión	4.23E-04
Prandtl	3.91

Se realiza el cálculo del número de Reynolds dentro de la tubería con la siguiente ecuación (1) (Incropera, 1999).

$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (1)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación (1) se obtiene:

$$Re_D = \frac{4(0.3272 \text{ Kg/s})}{3.141516 * 0.009525 \text{ m} * 5.94 \times 10^{-4} \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * m} = 73634.71 \quad (1)$$

El  $Re_D$  se encuentra dentro del régimen turbulento según el diagrama de Moody.

El número de Prandtl, se obtuvo del apéndice “A” del Incropera. Se empleó la ecuación 2 para verificar que el flujo este totalmente desarrollado (Arreola, 2010).

$$L_h = 10 * d_{ext} \quad (2)$$

Donde  $d_{ext}$  representa al diámetro exterior del tubo de cobre

Sustituyendo los valores en la ecuación (2), se tiene:

$$L_h = 7 * 0.009525 \text{ m} = 0.066 \text{ m} \quad (2)$$

El valor que se obtuvo para la longitud de la entrada es menor que el de la longitud del serpentín, por lo tanto se dice que el flujo está totalmente desarrollado y se pueden despreciar los efectos de la longitud de entrada.

Para el cálculo del número de Nusselt, se empleó la ecuación 3 (Sadik, 2002), para la convección forzada dentro de un tubo en espiral de manera helicoidal en flujos internos dentro de la tubería para régimen turbulento y considerando el flujo totalmente desarrollado además de controlar las siguientes características:

$$2 \times 10^4 < Re < 1.5 \times 10^5$$

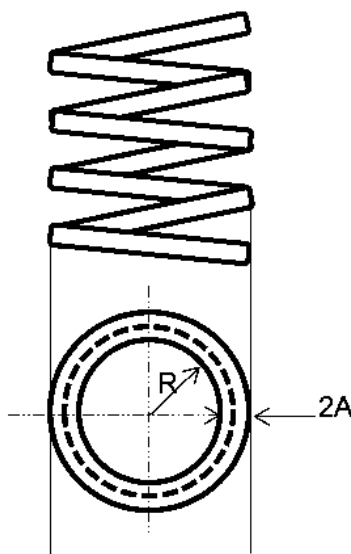
$$5 < \frac{R}{a} < 84$$

$$\frac{Nu_c}{Nu_s} = 1 + 3.6 \left(1 - \frac{a}{R}\right) \left(\frac{a}{R}\right)^{0.8} \quad (3)$$

Dónde:

$Nu_s$  = Es el Nusselt calculado considerando el tubo recto.

$Nu_c$  = Es el Nusselt calculado tomando en cuenta un serpentín.



**Figura 1. Dimensiones del serpentín**

La figura 1 muestra un diagrama donde se puede apreciar la configuración del serpentín de cobre con el objetivo de visualizar de manera más sencilla cada una de las variables necesarias para el diseño.

a: radio del serpentín;  $4.7625 \times 10^{-3} \text{m}$  (Sadik, 2002).

R: radio de las vueltas del serpentín y está dado por la apertura que el reactor tiene en la parte superior, el valor es 0.25 m.

Por lo tanto el valor de R/a (4) (Sadik, 2002):

$$\frac{R}{a} = \frac{0.25 \text{m}}{4.7625 \times 10^{-3} \text{m}} = 52.4934 \quad (4)$$

La siguiente ecuación (5) (Incropera, 1999), determina el número de Nusselt para tubos de bajo régimen recto:

$$Nu_s = 0.023 * Re^{0.8} * pr^{0.4} \quad (5)$$

Teniendo;  $Re = 73634.7$  y  $pr = 3.55$

Sustituyendo en la ecuación 5, se obtiene:

$$Nu_s = 0.023 * (73634.71)^{0.8} * (3.55)^{0.4} \quad (5)$$

$$Nu_s = 0.023 * 7828.27 * 1.6599$$

$$Nu_s = 298.865$$

Al sustituir en la ecuación 3 se tiene que:

$$\frac{Nu_c}{Nu_s} = 1 + 3.6 \left(1 - \frac{a}{R}\right) \left(\frac{a}{R}\right)^{0.8} \quad (3)$$

Conociendo:

$$Nu_s = 298.865$$

$$a = 4.7625 \times 10^{-3} \text{m}$$

$$R = 0.25 \text{m}$$

Se obtuvo:

$$\frac{Nu_c}{298.865} = 1 + 3.6 \left(1 - \frac{4.7625 \times 10^{-3}}{0.25}\right) \left(\frac{4.7625 \times 10^{-3}}{0.25}\right)^{0.8} \quad (3)$$

$$Nu_c = 343.18$$

Con el número de Nusselt para el serpentín helicoidal se obtiene el coeficiente de convección forzada con la ecuación 6 (Kern, 1999), del lado interno del tubo.

$$h_{int} = Nu_c * \frac{Kagua}{D_{int}} \quad (6)$$

Donde:

$$K_{agua} = 6.40E-04 \text{ W/mK}$$

$$D_{int} = 0.007938 \text{ m}$$

$$Nu_c = 343.18$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 6, obteniendo finalmente el coeficiente de convección para el lado interno del tubo:

$$h_{int} = 343.18 * \frac{6.40 \times 10^{-4}}{0.007938} \quad (6)$$

$$h_{int} = 27.6688 \frac{\text{Kw}}{\text{m}^2 * \text{K}}$$

Cálculo de la  $h_{externa}$ .

Consideraciones.

El análisis del lado externo del serpentín está basado en la convección natural, sin embargo en ésta a menudo no se distingue el movimiento del fluido debido a las bajas velocidades que intervienen en el proceso. La transferencia por convección tiene dependencia significativa con la velocidad del fluido; entre más alta sea la velocidad más alto es el coeficiente. La velocidad del fluido externo es baja comparado con el fluido interno, el coeficiente será menor en comparación con el coeficiente de la convección forzada.

Para el coeficiente externo se determinó el número de Grashof (7) (Incropera, 1999):

$$Gr_d = \frac{g * \beta_e * (t_1 - t_e) * l_{ce}^3}{\nu_{ce}^2} \quad (7)$$

Donde:

$$g = \text{Fuerza de gravedad} = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\beta_e = \text{Coeficiente de expansión térmica} = 3.39E-05$$

$$t_1 = \text{Temperatura de la superficie caliente} = 45^\circ\text{C}$$

$$l_{ce} = \text{Longitud característica para transferencia de calor en un tubo horizontal} = 0.009525 \text{ m}$$

$\nu_{ce}$  = Viscosidad cinemática para el inóculo=  $4.53 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

$t_e$  = Temperatura del área más alejada de la superficie=  $21.8^\circ\text{C}$

Sustituyendo en la ecuación 7, se obtuvo:

$$Gr_d = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 * 3.39 \times 10^{-5} * (45^\circ\text{C} - 21.8^\circ\text{C}) * (0.009525 \text{ m})^3}{(4.53 \times 10^{-5})^2} \quad (7)$$

$$Gr_d = \frac{6.6673252 \times 10^{-9}}{2.05209 \times 10^{-9}} = 3.249041 \quad (7)$$

Para obtener el número de Prand se utiliza la ecuación 8 (Incropera, 1999):

$$Pr = \frac{\nu_{de} * C_{pe}}{K_e} \quad (8)$$

Dónde:

$$\nu_{de} = 1.27232$$

$$C_{pe} = 8.960 \text{ KJ/mK}$$

$$K_e = 0.0067 \text{ W/m K}$$

Sustituyendo en la ecuación 8:

$$Pr = \frac{1.27232 * 8.960}{0.0067} \quad (8)$$

$$Pr = \frac{11.3999}{0.0067} \quad (8)$$

$$Pr = 1701.490627$$

Para la determinación del número de Rayleigh se utilizó la ecuación 9 (Incropera, 1999):

$$ra_d = Gr_d * pr \quad (9)$$

Sustituyendo en la ecuación 9 se obtiene:

$$ra_d = 3.249041 * 1701.4906 \quad (9)$$

$$ra_d = 5528.2133$$

Para obtener el número de Nusselt se empleó la ecuación 10 (Sadik, 2002) siguiente:

$$Nu_d = \left[ 0.6 + \frac{0.387 * rad^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + \left[ \frac{0.559}{Pre} \right]^{9/16} \right]^{9/27}} \right]^2 \quad (10)$$

Siempre y cuando  $ra_d \leq 10^{12}$

Debido a que cumple con la especificación de la ecuación 10 se puede hacer uso de ésta para determinar el valor del número de Nusselt correctamente, como se muestra a continuación:

$$Nu_d = \left[ 0.6 + \frac{0.387 * (5528.2133)^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + \left[ \frac{0.559}{1701.4906} \right]^{9/16} \right]^{9/27}} \right]^2 \quad (10)$$

$$Nu_d = \left( 0.6 + \frac{1.627328}{1.0036464} \right)^2 = 4.934687 \quad (10)$$

Para obtener el coeficiente de convección natural para el tubo horizontal ( $h_{de1}$ ), se utiliza la ecuación 11 (Kern, 1999):

$$h_{de1} = \frac{Nu_d * Ke}{lc_{de}} \quad (11)$$

Sustituyendo en la ecuación 11:

$$h_{de1} = \frac{4.934687 * 0.0067}{0.009525} \quad (11)$$

$$h_{de1} = \frac{0.033062402}{0.009525} = 3.471118 \text{ w/m}^2\text{s} \quad (11)$$

Tomando en cuenta la convección natural del lado de la biomasa, para el lado vertical del serpentín, donde la longitud característica fue la altura del total del serpentín se obtuvo una ecuación que relaciona un intervalo aceptable del número de Rayleigh.

Basándose en lo anterior el número de Grashof se escribe con la ecuación 12 (Incropera, 1999):

$$Gr_d = \frac{g * \beta_e * (t_1 - t_e) * l_{ce}^3}{\nu_e^2} \quad (12)$$

Dónde:

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\beta_e = 3.39\text{E-}05$$

$$t_1 = 45^\circ\text{C}$$

$$l_{cel} = 0.77 \text{ m}$$

$$\nu_{ce} = 4.53\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$t_e = 21.8^\circ\text{C}$$

Sustituyendo los datos anteriores en la ecuación 4.12:

$$Gr_l = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 * 3.39 \times 10^{-5} * (45^\circ\text{C} - 21.8^\circ\text{C}) * (0.77\text{m})^3}{(4.53 \times 10^{-5})^2} \quad (12)$$

$$Gr_l = 1716454.931$$

El cilindro vertical se puede tomar como una placa vertical, si la relación de la ecuación 13 (Arreola, 2010), se cumple:

$$Dext \geq \frac{35 * l_{cel}}{Gr_l} \quad (13)$$

Sustituyendo en la ecuación 13 los valores se tiene que:

$$Dext \geq \frac{35 * 0.77\text{m}}{(1716454.931)} = 1.57 \times 10^{-5} \text{ m} \quad (13)$$

Esta condición se cumple por lo que se puede considerar el cilindro vertical como una placa vertical y utilizando la ecuación 14 (Kern, 1999).

$$Nu_l = 0.1 * ra_l^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

Para la siguiente relación *Rayleigh*  $10^9$  a  $10^{13}$

Se obtuvo el número de Rayleigh con la ecuación 15 (Incropera 1999):

$$ra_d = Grd * pre \quad (15)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 15 se encontró que:

$$ra_d = 1716454.931 * 1701.490627 = 2.920531977 \times 10^9 \quad (15)$$

Por lo tanto se puede observar que el valor del número de Rayleigh se encuentra dentro del intervalo que se debe cumplir para que la ecuación 14 sea empleada.

Sustituyendo en la ecuación 14 se tiene que:

$$Nu_l = 0.1 * 2.920531977 \times 10^9^{\frac{1}{3}} = 142.94 \quad (14)$$

Para calcular el coeficiente de convección externo se empleó la ecuación 16 (Incropera, 1999), para la configuración de un cilindro vertical.

$$h_{de2} = \frac{Nu_d * Ke}{lc_l} \quad (16)$$

Sustituyendo valores en la ecuación (16):

$$h_{de2} = \frac{142.94 * 0.0067 \frac{Kw}{m * K}}{0.77m} = 1.2437 \frac{Kw}{m^2 * K} \quad (16)$$

Se realiza la suma algebraica para los coeficientes externos considerando que; está un cuerpo caliente vertical y uno horizontal dentro del bioreactor por lo que se tiene que el coeficiente externo total está dado por la ecuación 17 (Kern, 1999):

$$h_{externa} = h_{de1} + h_{de2} \quad (17)$$

Sustituyendo en 17 se obtuvo:

$$h_{externa} = 3.471118 + 1.2437 \quad (17)$$

$$h_{externa} == 4.714818 \frac{Kw}{m^2} * K$$

Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor

Una vez que se calcularon los coeficientes de convección internos y externos, se realizó el cálculo para la obtención del coeficiente global de transferencia de calor; este parámetro es gobernado por el coeficiente de calor más pequeño, se puede tener dos coeficientes globales uno basado en el área interna del tubo y otro en el área externa.

Para obtener el valor de este coeficiente se empleó la ecuación 18 (Incropera, 1999), que se escribe a continuación:

$$\frac{1}{U * A_s} = r_{total} \quad (18)$$

Dónde:

$A_s$  = Área de transferencia de calor que se considera como el área externa.

Para obtener r total se usa la ecuación 19 (Ludwing, 2001), escrita a continuación:

$$r_{total} = \frac{1}{h_{int} * A_{int}} + \frac{R_{f_{int}}}{A_{int}} + R_{pared} + \frac{R_{f_{ext}}}{a_{ext}} + \frac{1}{h_{ext} * A_{ext}} \quad (19)$$

Donde:

$R_{pared}$  = Resistencia térmica de pared

$R_{f_{int}}$  = Coeficiente de limpieza para la pared interior

$R_{f_{ext}}$  = Coeficiente de limpieza para la pared externa

Para la resistencia térmica de la pared se tiene la ecuación 20 (Ludwing, 2001).

$$R_{pared} = \frac{\ln\left(\frac{d_{ext}}{d_{int}}\right)}{2 * \pi * k_{cobre} * l_{ser}} \quad (20)$$

$k_{cobre}$  = Conductividad térmica del cobre

$L_{ser}$  = La longitud total del serpentín

Se consideró el valor siguiente para la conductividad térmica del cobre

$$k_{\text{cobre}} = 0.385 \frac{Kw}{m * K}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 20, para calcular la resistencia de la pared se obtuvo:

$$R_{\text{pared}} = \frac{\ln\left(\frac{0.009525m}{0.007938m}\right)}{2 * \pi * 0.385 \frac{Kw}{m * K} * 7m} = 0.0106 \frac{K}{kw} \quad (20)$$

Se consideran los siguientes valores para los coeficientes de limpieza (Arreola, 2010).

$$R_{f_{\text{int}}} = \frac{1}{11.350} \frac{Kw}{m^2 * K}$$

$$R_{f_{\text{ext}}} = 0.5 \frac{Kw}{m^2 * K}$$

Para complementar la ecuación de la resistencia total, se calculan las áreas interna y externa del serpentín, donde se utilizan las ecuaciones 21 y 22 (Ludwing, 2001).

$$A_{\text{int}} = \pi * d_{\text{int}} * l_{\text{ser}} \quad (21)$$

$$A_{\text{ext}} = \pi * d_{\text{ext}} * l_{\text{ser}} \quad (22)$$

Sustituyendo en las ecuaciones 21 y 22 (Ludwing, 2001) se obtuvo:

$$A_{\text{int}} = \pi * 0.007938m * 7m = 0.1745m^2 \quad (21)$$

$$A_{\text{ext}} = \pi * 0.009525m * 7 = 0.2094m^2 \quad (22)$$

Sustituyendo en la ecuación 19, la resistencia total tiene como valor:

$$r_{\text{total}} = \frac{1}{27.6688 * 0.1745} + \frac{1}{11.350} \frac{Kw}{m^2 * K} + 0.007537 \frac{K}{kw} + \frac{0.5}{0.2094m^2} \frac{Kw}{m^2 * K} \quad (19)$$

$$+ \frac{1}{4.714818 \frac{Kw}{m^2} * K * 0.2094} = 4.12 \frac{k}{Kw}$$

Retomando la ecuación 18, y sustituyendo los valores requeridos para este cálculo se obtuvo:

$$U = \frac{1}{r_{total} * A_s} = \frac{1}{4.12 * 0.2992} = 0.8112 \frac{Kw}{K * m^2} \quad (18)$$

Este cálculo se basa en la suposición de entrada de agua caliente para el serpentín sin variaciones de temperatura a través del tiempo, por lo que la temperatura toma un valor constante de entrada igual a 45°C, sin tomar en cuenta la fuente de calor.

## A2. Correlación de Pearson

Se realizaron las matrices de correlación lineal de Pearson, para cada mes, sin embargo se obtuvieron los siguientes resultados:

### Enero

	Temperatura term	Temperatura reac	Radiación solar	Vel del aire	Nubosidad
Temperatura term					
Temperatura reac	0.736				
Radiación solar	0.865	0.431			
Vel del aire	-0.522	-0.471	-0.38		
Nubosidad	0.439	0.463	0.125	-0.089	
Temperatura del ambiente	0.779	0.812	0.469	-0.666	0.566
	0	0	0.021	0	0.004

De acuerdo a la tabla anterior se observa que la temperatura del termotanque presenta una correlación positiva con la temperatura del reactor, la radiación solar, la nubosidad y la temperatura del ambiente, mientras que con la velocidad del aire se observa que la relación es negativa, lo que indica que mientras una incrementa la otra variable disminuye, lo anterior se puede corroborar en la gráfica 4.2 a) y b).

Por otra parte la temperatura del reactor se correlaciona de manera lineal también con la radiación solar, la nubosidad y la temperatura del ambiente, sin embargo existe una relación negativa con la velocidad del viento, demostrando que existe una influencia de esta, sobre la temperatura del reactor.

Además la temperatura ambiente presenta una relación con la radiación solar y la nubosidad, mientras que la velocidad del aire disminuye cuando la temperatura del ambiente incrementa y viceversa.

## Febrero

	Temperatura term	Temperatura reac	Radiación solar	Vel del aire	Nubosidad
Temperatura term					
Temperatura reac	0.752				
	0				
Radiación solar	0.824	0.581			
	0	0.003			
Vel del aire	0.828	0.769	0.815		
	0	0	0		
Nubosidad	0.821	0.504	0.982	0.789	
	0	0.012	0	0	
Temperatura del ambiente	0.672	0.817	0.532	0.618	0.483
	0	0	0.008	0.001	0.017

En la tabla anterior se observa que la temperatura del termotanque se correlaciona de manera lineal con la temperatura del reactor, la radiación solar, la nubosidad, la velocidad del viento, esta última incrementa cuando la temperatura del termotanque baja y viceversa, esto puede deberse a que la temperatura ambiente tiene una relación grande con la velocidad del viento. Por otra parte la temperatura del reactor se relaciona de manera lineal con la radiación solar, la velocidad del aire, la nubosidad y la temperatura del ambiente.

Además la radiación solar también presenta una relación con la velocidad del viento y la radiación solar, así como con la temperatura ambiente.

## Marzo

	Temperatura term	Temperatura reac	Radiación solar	Vel del aire	Nubosidad
Temperatura term					
Temperatura reac	0.096				
	0.656				
Radiación solar	0.52	0.439			
	0.009	0.032			
Vel del aire	0.377	0.141	0.713		
	0.07	0.51	0		
Nubosidad	0.835	0.34	0.777	0.519	
	0	0.104	0	0.009	
Temperatura del ambiente	0.874	-0.226	0.312	0.141	0.648
	0	0.288	0.137	0.51	0.001

Se observa en la tabla anterior que durante el mes de Marzo, la temperatura del termotanque se ve afectada por la radiación solar, la nubosidad y la temperatura del ambiente, sin embargo, la temperatura del reactor únicamente se ve afectada por la radiación solar, la cual se relaciona con la nubosidad y la velocidad del aire. Por otra parte a pesar de que, ni la temperatura del reactor ni la del termotanque tienen relación directa con la velocidad del aire, si la tienen con otros parámetros que si se ven influenciados por ella.

Se observa en la gráfica 4.4 a) y b) que las correlaciones obtenidas por la matriz de Pearson, son congruentes.

## Abril

	Temperatura term	Temperatura reac	Radiación solar	Vel del aire	Nubosidad
Temperatura term					
Temperatura reac	0.553				
	0.005				
Radiación solar	0.976	-0.45			
	0.006	0.027			
Vel del aire	-0.199	-0.57	0.608		
	0.352	0.004	0.002		
Nubosidad	-0.215	0.109	0.127	0.322	
	0.314	0.611	0.554	0.126	
Temperatura del ambiente	-0.381	-0.567	0.369	0.726	0.558
	0.066	0.004	0.076	0	0.005

La temperatura del termotanque tiene una relación grande y lineal con la temperatura del reactor y la radiación solar, en la gráfica 4.5 a) se observa que las curvas tanto de la temperatura del termotanque como de la temperatura del reactor, se comportan de forma similar, hasta que esta última llega a los 35 °C.

Por otra parte, la temperatura del reactor se relaciona con la radiación solar, la velocidad del aire y la temperatura del ambiente, esta correlación es negativa lo que indica que mientras una variable incrementa su valor otra disminuye. Además la radiación solar está relacionada con la velocidad del aire, de igual manera esta se correlaciona con la temperatura ambiente y ésta con la nubosidad.

## Mayo

	Temperatura term	Temperatura reac	Radiación solar	Vel del aire	Nubosidad
Temperatura term					
Temperatura reac	0.838				
	0				
Radiación solar	-0.259	0.774			
	0.222	0.062			
Vel del aire	-0.401	-0.25	0.783		
	0.052	0.239	0		
Nubosidad	-0.253	-0.002	0.929	0.746	
	0.233	0.992	0	0	
Temperatura del ambiente	0.576	0.81	0.589	0.241	0.544
	0.003	0	0.002	0.257	0.006

Durante el mes de Mayo, la temperatura del reactor únicamente se correlaciona con la temperatura ambiente y con la temperatura del termotanque, debido a que el reactor comienza a llegar a la temperatura deseada (35°C) y la pérdida que presenta es debido al medio ambiente y la alimentación de agua fría, sin embargo el calentador solar si presenta influencia de la velocidad del aire y la temperatura del ambiente, esto es ya que, como se observa en la gráfica 6 a) durante medio día el reactor se encontró en 35°C, lo que indica que no existió consumo de agua caliente del termotanque.

Por otra parte la radiación solar se relaciona con la nubosidad, la velocidad del viento y la temperatura del medio ambiente.

## Junio

	Temperatura term	Temperatura reac	Radiación solar	Vel del aire	Nubosidad
Temperatura term					
Temperatura reac	0.098				
	0.65				
Radiación solar	-0.524	-0.325			
	0.009	0.122			
Vel del aire	0.084	-0.548	0.502		
	0.696	0.006	0.012		
Nubosidad	0.008	-0.148	0.39	0.404	
	0.969	0.491	0.06	0.05	
Temperatura del ambiente	-0.324	-0.164	0.554	0.282	0.031
	0.123	0.445	0.005	0.182	0.884

Como se observa en la Gráfica 4.7 a), el reactor mantuvo la temperatura en 35°C, por lo tanto no requirió agua caliente del calentador solar, debido a esto, la correlación de Pearson muestra que: la velocidad del aire es el único parámetro que afecta a la temperatura del reactor, por otra parte la temperatura del termotaque es afectada por la radiación solar y esta a su vez se relaciona con la velocidad del aire y la temperatura ambiente. Además se observa que la nubosidad es afectada por la velocidad del aire.

## Julio

	Temperatura term	Temperatura reac	Radación solar	Vel del aire	Nubosidad
Temperatura term					
Temperatura reac	0.213				
	0.317				
Radación solar	-0.223	0.073			
	0.294	0.733			
Vel del aire	-0.544	-0.188	0.56		
	0.006	0.379	0.004		
Nubosidad	-0.074	-0.282	-0.363	0.163	
	0.73	0.181	0.081	0.448	
Temperatura del ambiente	-0.512	-0.356	0.606	0.564	0.127
	0.011	0.087	0.002	0.004	0.555

Durante el mes de Julio la temperatura del reactor permanece constante en 35 °C, en la correlación de Pearson, como muestra la tabla anterior no se observa una relación con algún parámetro medido, sin embargo en el caso de que se llegará a requerir agua de calentamiento, la temperatura del calentador solar se ve afectada por la velocidad del aire y la temperatura del medio ambiente, por otra parte ésta última se relaciona también con la radiación solar y la temperatura del medio ambiente. Además de que se muestra también que la velocidad del viento tiene efecto sobre la nubosidad, ya que, como se muestra en la gráfica 4.8 b), el viento presentó velocidades elevadas (5 m/s)