UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA

TESIS

“Incremento del rendimiento de un digestor anaerobio escala casera utilizando la energía térmica de su biogás producido”

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA

PRESENTA:
ABIGAIL FLORES AYALA

DIRECTOR DE TESIS:
DR. MARIO ESPARZA SOTO

DIRECTORES ADJUNTOS:
DR. CHEIKH FALL
DRA. MERCEDES LUCERO CHÁVEZ

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, OCTUBRE DE 2024

ACRÓNIMOS

@STP	Condiciones estándar de presión y temperatura
°C	Grado Celsius
”	Pulgada(s)
a.m.	Antes de meridiano
A_{aire}	Área superficial en contacto con el aire
AS	Área superficial
A_{suelo}	Área superficial en contacto con el suelo
A_{sub}	Área superficial en contacto con el subsuelo
AGV	Ácidos grasos volátiles
C	Carbono
c_{inf}	Concentración de sólidos volátiles en el influente
c_{efl}	Concentración de sólidos volátiles en el efluente
CH_4	Metano
cm	Centímetro(s)
CO_2	Dióxido de carbono
COV	Carga orgánica volumétrica
C_{ps}	Calor específico del influente
d	Día(s)
D	Diámetro
DA	Digestión anaerobia
DAEC	Digestor anaerobio escala casera
DQO	Demanda química de oxígeno
DV	Diferencial de volumen
Dt	Diferencial de tiempo
e	Espesor del aislante
ETB	Energía teórica del biogás (W)
g	Gramo(s)
h	Hora(s)
H	Altura
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía

IITCA	Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua
J	Joule(s)
kJ	Kilo joule
k	Coeficiente de transferencia de calor global
K	Kelvin
$\mathbf{k_{c\ aire}}$	Coeficiente de transferencia de calor hacia el aire
$\mathbf{k_{c\ suelo}}$	Coeficiente de transferencia de calor hacia el suelo
$\mathbf{k_{c\ sub}}$	Coeficiente de transferencia de calor hacia el subsuelo
kg	Kilógramo(s)
$\mathbf{k_{in}}$	Coeficiente de transferencia de calor por conducción
$\mathbf{k_{mat}}$	Coeficiente de transferencia de calor de los materiales aislantes
$\mathbf{k_{out}}$	Coeficiente de transferencia de calor por convección hacia el ambiente
L	Litro(s)
LAP	Lodo activado de purga
LCA	Laboratorio de calidad del agua
LMH	Laboratorio de modelos hidráulicos
$\mathbf{L_r}$	Litros del reactor
m	Metro(s)
$\mathbf{m^2}$	Metro(s) cuadrado(s)
$\mathbf{m^3}$	Metro(s) cúbico(s)
mg	Miligramo(s)
$\mathbf{MH_{agre}}$	Masa húmeda agregada
min	Minuto(s)
mL	Mililitro(s)
$\mathbf{MP_{med}}$	Metano producido medido
$\dot{\mathbf{m}}\mathbf{s}$	Flujo másico
N	Nitrógeno
NaOH	Hidróxido de sodio
PB	Producción de biogás medido
$\mathbf{PB_{teo@STP}}$	Producción de biogás teórica a condiciones estándar de presión y temperatura

PC	Poder calorífico del biogás
PET	Polietileno tereftalato
pH	Potencial de hidrógeno
p.m.	Pasado de meridiano
PM	Producción de metano medido
$PM_{teo@STP}$	Producción de metano teórica a condiciones estándar de presión y temperatura
P_{op}	Presión de operación
PVB	Producción volumétrica de biogás
PVC	Policloruro de vinilo
PVM	Producción volumétrica de metano
P_{STP}	Presión estándar
Q	Caudal o flujo de alimentación
Q_C	Pérdidas de calor del digestor
Q_s	Calor necesario para calentar el influente
QT	Energía total
Rem	Remoción
REM	Rendimiento específico del metano
ROC	Residuos orgánicos de cocina
RSO	Residuos sólidos orgánicos
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SV	Sólidos volátiles
SV_{apli}	Sólidos volátiles aplicados
SV_{rem}	Sólidos volátiles removidos
t	Tiempo
T	Temperatura
T_{amb}	Temperatura ambiental
T_{op}	Temperatura de operación del digestor anaerobio
TRH	Tiempo de retención hidráulico
T_s	Temperatura inicial del influente
T_{STP}	Temperatura estándar

$\mathbf{V_{op}}$	Volumen de o Moncivais – Gómez peración
$\mathbf{V_r}$	Volumen del reactor
$\mathbf{V_{STP}}$	Volumen a condiciones estándar de presión y temperatura
W	Watt(s)
Z	Relación altura/diámetro

RESUMEN

Actualmente los residuos sólidos orgánicos (RSO) representan el 50% del total de residuos sólidos urbanos. Los RSO causan contaminación con los gases de efecto invernadero y los lixiviados generados durante el proceso natural de biodegradación. Por otra parte, las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) trabajan con procesos biológicos que generan lodo activado de purga (LAP), el cual debe ser tratado para que no se convierta en un problema de contaminación.

La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico con el cual se pueden tratar los RSO y los LAP. Un factor importante de la DA es la temperatura de operación (35 °C), sin embargo, no en todas las regiones del país se alcanza esta temperatura ambiente, especialmente en el Valle de Toluca.

Por ello, se diseñó un sistema de calentamiento, con el objetivo de aumentar la temperatura de operación de un digestor anaerobio de escala casera con el biogás producido por el mismo digestor. Se construyó una cámara de combustión en donde se calentaba un litro de agua en un matraz con ayuda de un mechero Bunsen que quemaba el biogás producido. Dentro del digestor se colocó un serpentín de cobre a través del cual se recirculaba el agua caliente.

Se experimentó con tres configuraciones de calentamiento, las cuales diferían en los tiempos de recirculación de agua. En la primera configuración se recirculó agua caliente dentro del digestor durante 6 ciclos de 40:20 (OFF: ON), es decir, durante 40 min se calentó el agua y durante 20 min se recirculó el agua caliente dentro del digestor anaerobio; en la segunda configuración se recirculó el agua dentro del digestor durante 6 horas continuas y por último en la tercera corrida experimental la recirculación de agua se realizó las 24 h día de manera continua. En promedio se obtuvieron rendimientos específicos de metano (REM) de 15.40, 9.28 y 37.39 $L_{CH4@STP}/kg\text{-}MH_{Agr}$ en cada una de las configuraciones. En promedio durante toda la experimentación se removió el 72.33% de SV y se generó un biogás con 62.86% de metano.

La configuración más eficiente de acuerdo con los REM obtenidos fue cuando la recirculación de agua se realizó las 24 horas del día, esto se debió a que las fluctuaciones

de temperatura del digestor fueron menos notorias. La recirculación continua de agua caliente ayudó a contrarrestar las pérdidas de calor del digestor a través de sus paredes. Cabe resaltar que es importante seguir estudiando el cómo aplicar sistemas de calentamiento para poder hacer más eficientes los procesos de digestión anaerobia.

ABSTRACT

Nowadays, organic solid waste (OSW) represents 50% of the total urban solid waste. OSW causes pollution with greenhouse gases and leachates generated during the natural biodegradation process. On the other hand, wastewater treatment plants (WWTP) work with biological processes that generate activated sludge (AS), which must be treated so that it does not become a pollution problem.

Anaerobic digestion (AD) is a biological process with which OSW and AS can be treated. An important factor in AD is the operating temperature (35 °C), however, not all regions of the country reach this ambient temperature, especially in the Toluca Valley.

Therefore, a heating system was designed with the aim of increasing the operating temperature of a home-scale anaerobic digester with the biogas produced by the digester itself. A combustion chamber was built where a litre of water was heated in a flask using a Bunsen burner that burned the biogas produced. A copper coil was placed inside the digester through which the hot water was recirculated.

Three heating configurations were experimented with, which differed in the water recirculation times. In the first configuration, hot water was recirculated inside the digester during 6 cycles of 40:20 (OFF:ON), that is, the water was heated for 40 min and the hot water was recirculated inside the anaerobic digester for 20 min; in the second configuration, the water was recirculated inside the digester for 6 continuous hours and finally, in the third experimental run, the water was recirculated continuously for 24 h a day. On average, specific methane yields (SME) of 15.40, 9.28 and 37.39 $L_{CH4@STP}$/ kg-MH_{Agr} were obtained in each of the configurations. On average, 72.33% of SV was removed throughout the experiment and a biogas with 62.86% methane was generated.

The most efficient configuration according to the SME obtained was when water recirculation was carried out 24 hours a day, this was because the temperature fluctuations of the digester were less noticeable. The continuous recirculation of hot water helped to counteract the heat losses of the digester through its walls. It should be noted that it is important to continue studying how to apply heating systems to make anaerobic digestion processes more efficient.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN 1
2. ANTECEDENTES 3
2.1 Digestión anaerobia 3
2.2 Digestión anaerobia de residuos de comida 3
2.3 Efecto de la temperatura de operación en la digestión anaerobia 6
2.4 Sistemas de calentamiento de digestores anaerobios 8
3. JUSTIFICACIÓN CONTEXTUAL Y CIENTÍFICA 13
4. HIPÓTESIS 15
5. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS 15
5.1 Objetivo general 15
5.2 Objetivos específicos 15
6. METODOLOGÍA 16
6.1 Operación de un Reactor de lodos activados 16
6.2 Preparación de sustrato de codigestión 17
6.3 Operación de un digestor anaerobio de 160 L 17
6.4 Pruebas preliminares de calentamiento de agua 18
6.4.1 Calentamiento en una hielera de 50 L utilizando un serpentín de cobre de 3/8” de diámetro y 5 m de longitud 20
6.4.2 Calentamiento en un contenedor de 140 L, sin aislante y con un serpentín de 5 m y 20 ciclos de calentamiento 20
6.4.3 Calentamiento en un contenedor de 140 L, con aislante y con un serpentín de 18 m, y 20 ciclos de calentamiento 21
6.4.4 Calentamiento en un contenedor de 140 L, con aislante y con un serpentín de 18 m, y 6 ciclos de calentamiento 21
6.5 Sistema digestor anaerobio escala casera/calentador 21
6.6 Operación de un digestor anaerobio escala casera de 140 L 23
6.7 Calentamiento de un digestor anaerobio escala casera de 140 L 24
6.7.1 Calentamiento de un digestor anaerobio escala casera de 140 L con 6 ciclos de calentamiento 24
6.7.2 Calentamiento de un digestor anaerobio escala casera de 140 L con calentamiento continuo de 6 horas 24
6.7.3 Calentamiento de un digesto anaerobio escala casera de 140 L con calentamiento continuo 24 h al día 24
6.8 Métodos analíticos 25
6.9 Cálculos 25

6.10 Análisis estadístico 29
7. RESULTADOS 30
7.1 Estudio teórico de requerimientos de energía de digestores anaerobios a distintas escalas 30
7.2 Rendimientos del digestor anaerobio de 160 L del Laboratorio de Modelos hidráulicos 36
7.2.1 Producción de biogás y % de metano 36
7.2.2 Eficiencia de remoción de sólidos volátiles 37
7.2.3 pH 38
7.2.4 Temperatura de operación del digestor anaerobio de 160 L 38
7.3 Pruebas preliminares de calentamiento 39
7.3.1 Calentamiento en una hielera de 50 L utilizando un serpentín de cobre de 5 m 39
7.3.2 Calentamiento en un contenedor de 140 L con un serpentín de cobre de 5 m y sin aislante 43
7.3.3 Calentamiento en un contenedor de 160 L con un serpentín de cobre de 18 m y con aislante 46
7.3.4 Calentamiento en un contenedor de 160 L con un serpentín de cobre de 18 m y con aislante (calentamiento de día) 48
7.4 Calentamiento de un digestor anaerobio de 140 L 50
7.4.1 Calentamiento de un digestor anaerobio escala casera de 140 L con 6 ciclos de calentamiento 52
7.4.2 Calentamiento de un digestor anaerobio escala casera de 140 L con calentamiento continuo de 6 horas 54
7.4.3 Calentamiento de un digestor anaerobio escala casera de 140 L con calentamiento continuo 24 h al día 55
7.5 Rendimientos del digestor anaerobio de 140 L del Laboratorio de calidad del agua 56
7.5.1 Producción de biogás, % de metano y pH 57
7.5.2 Eficiencia de remoción de sólidos volátiles 59
7.5.3 Producción de metano 65
7.5.4 Rendimiento específico de metano 66
8. CONCLUSIONES 73
9. RECOMENDACIONES 74
10. REFERENCIAS 75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Reactor piloto de lodos activados de 200 L ocupado para la obtención de lodo activado de purga....16
Figura 2. Digestor anaerobio de 160 L. 18
Figura 3. Sistema de calentamiento (Pruebas preliminares).....19
Figura 4. Configuración del sistema digestor anaerobio/calentador. 22
Figura 5. Balance global de energía....34
Figura 6. Producción de biogás en el digestor de 160 L. BK1= medidor de biogás 1, BK2= medidor de biogás 2 36
Figura 7. SV_{apli} y SV_{rem} en el digestor de 160 L 37
Figura 8. pH del digestor de 160 L 38
Figura 9. Temperatura ambiental del Laboratorio de Modelos Hidráulicos....39
Figura 10. Calentamiento en hielera de 50 L, 20 ciclos de calentamiento 40:20 (OFF: ON) 41
Figura 11. Calentamiento en hielera de 50 L, 20 ciclos de calentamiento 40:20 (OFF: ON) (Con temporizador)....42
Figura 12. Calentamiento en hielera de 50 L, 20 ciclos de calentamiento 40:20 (OFF: ON) (Fin de semana)....42
Figura 13. Calentamiento en contenedor de 160 L sin aislante, 20 ciclos 40:20 (OFF: ON) 44
Figura 14. Comportamiento escalonado en el calentamiento en contenedor de 160 L sin aislante, 20 ciclos 40:20 (OFF: ON) 44
Figura 15. Calentamiento en contenedor de 160 L sin aislante (Fin de semana), 20 ciclos 40:20 (OFF: ON) 45
Figura 16. Calentamiento en contenedor de 160 L con aislante, 20 ciclos 40:20 (OFF: ON) 47
Figura 17. Calentamiento en contenedor de 160 L con aislante (Fin de semana), 20 ciclos 40:20 (OFF: ON) 48
Figura 18. Calentamiento en contenedor de 160 L con aislante, 6 ciclos 40:20 (OFF: ON) 49
Figura 19. Calentamiento en contenedor de 160 L con aislante, 6 ciclos 40:20 (OFF: ON) 50
Figura 20. Temperatura ambiente LCA y temperatura de operación de digestor anaerobio de 140 L. Las líneas verticales punteadas separan las tres corridas experimentales. 51
Figura 21. ΔT entre temperatura ambiente LCA y temperatura de operación de digestor anaerobio de 140 L. Las líneas verticales punteadas separan las tres corridas experimentales. 52
Figura 22. Temperatura ambiente y temperatura de operación durante la primera corrida 53
Figura 23. Temperatura ambiente y temperatura de operación durante la segunda corrida 55
Figura 24. Temperatura ambiente y temperatura de operación durante la tercera corrida 56
Figura 25. pH y porcentaje de metano en el digestor anaerobio de 140 L. 59

Figura 26. Concentración de SV en el influente y efluente del digestor anaerobio de 140 L. 60
Figura 27. Porcentajes de remoción de SV en el digestor anaerobio de 140 L 62
Figura 28. Relación SV/ST en el influente y el efluente 64
Figura 29. Producción de metano y carga orgánica volumétrica en el digestor anaerobio de 140 L. 66
Figura 30. Rendimientos específicos de metano del digestor anaerobio de 140 L 67
Figura 31. Producción volumétrica de metano del digestor anaerobio de 140 L 68
Figura 32. Comparación de REM 70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de investigaciones de DA de ROC 4
Tabla 2. Métodos de prueba a realizar al sustrato de codigestión, efluente y biogás 25
Tabla 3. Datos iniciales para el estudio teórico de requerimientos de energía 30
Tabla 4. Flujo o gasto de alimentación (L/d) para digestores a distintas escalas y TRH´s 30
Tabla 5. Biogás teórico producido ($PB_{teo@STP}$) considerando el 70% de remoción de SV 31
Tabla 6. Energía teórica del biogás (W) 31
Tabla 7. Requerimientos de energía (W) para elevar la temperatura del influente 31
Tabla 8. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor del digestor 32
Tabla 9. Dimensiones y coeficientes de transferencia de calor de digestores a distintas escalas 32
Tabla 10. Pérdidas de calor a través de las paredes del digestor hacia el ambiente 32
Tabla 11. Energía total disponible (Q_T = ETB – Q_S - Q_C) 33
Tabla 12. Porcentaje de energía para calentar el influente (Qs) respecto a las pérdidas de energía a través de las paredes del digestor (Q_c) 35
Tabla 13. Tabla comparativa del porcentaje remoción sólidos volátiles 63
Tabla 14. Comparación de REM en sistemas con y sin sistema de calentamiento 71

1. INTRODUCCIÓN

En México actualmente se generan millones de kilogramos de residuos sólidos urbanos (INEGI, 2022), donde el 50% representa a los residuos sólidos orgánicos que en su mayoría son residuos orgánicos de cocina (ROC) (De Anda, 2021). Este tipo de residuos generalmente terminan en rellenos sanitarios como parte de su disposición final.

Por otra parte, las PTAR trabajan en su mayoría con procesos biológicos, de los cuales se obtiene como residuo lodo activado de purga (LAP) que si no tiene un tratamiento y disposición final correcto también puede convertirse en un factor de contaminación.

La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico eficaz para el tratamiento y la revalorización de los ROC y LAP, con el cual además de tratar este tipo de residuos, nos genera una energía alterna como lo es el biogás. Aunque la DA es un proceso longevo, tiene aspectos que faltan estudiar a profundidad. Uno de ellos es la temperatura de operación; si bien se ha dicho en diversas investigaciones que la temperatura de operación ideal es la mesofílica (35 °C), en la aplicación real, fuera de las escalas a nivel laboratorio, mantener estas temperaturas es un proceso complicado y de altos costos monetarios.

El-Mashad et al. (2004a), Zhong et al. (2015) y Zupancic & Ros (2003) presentan análisis teóricos energéticos de digestores anaerobios, considerando los requerimientos de calor como la suma de la energía utilizada para calentar el influente y la energía para compensar las pérdidas a través de las paredes del digestor anaerobio.

Por tanto, el objetivo de esta investigación fue aumentar el rendimiento especifico de metano (REM) de un digestor anaerobio escala casera (DAEC), es decir, un digestor diseñado para tratar los ROC generados en un hogar promedio (con base en experiencias anteriores), con un sistema de calentamiento que usó el biogás producido por el digestor para generar energía térmica. Debido a que la temperatura ambiental en Toluca es relativamente baja durante las noches y en invierno, y a que los cambios de temperatura ambiental varían mucho durante las 24 horas de un día,

en esta investigación no se buscó llegar a temperaturas de operación mesófilas en el DAEC, simplemente se buscó aumentar la temperatura de operación entre 25 y 30 °C y al mismo tiempo evitar las fluctuaciones bruscas de temperatura dentro del digestor.

Se estudió el rendimiento del digestor/calentador y se analizó el comportamiento del digestor anaerobio con cada una de las configuraciones de calentamiento con las que se experimentó. De igual forma se compararon los rendimientos de un DAEC con y sin calentamiento para determinar la viabilidad de realizar este tipo de aplicaciones.

Al aumentar el rendimiento del DAEC con el sistema de calentamiento a base de biogás podríamos decir que se satisfizo sus requerimientos energéticos de forma autónoma y se hizo una aplicación real al biogás generado por el propio digestor anaerobio.

2. ANTECEDENTES

2.1 Digestión anaerobia

La DA es un proceso biológico en donde microorganismos anaerobios, es decir, aquellas que trabajan en ausencia de oxígeno, descomponen la materia orgánica para formar dos principales productos: biogás (mayormente conformado por metano) y digestato.

El proceso de DA es llevado a cabo en 3 fases: hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis. En la primera fase, las moléculas grandes (polímeros) se rompen y se convierten en moléculas más sencillas (monómeros) debido a que entre más pequeña sea la molécula más fácil es de absorber y procesar por las bacterias; en la segunda fase, los monómeros se convierten en ácidos grasos volátiles de cadena corta (ácido acético, butírico y propiónico); y en la última fase, el ácido acético se convierte principalmente en metano y dióxido de carbono.

Existen diferentes factores que influyen en la DA, como son la temperatura, el pH, la naturaleza del sustrato, relación C/N en el sustrato, entre otros. Se consideran valores óptimos una temperatura mesofílica de 35 ºC, un pH dentro del rango de 6.5 a 7.5 y una relación C/N del sustrato de 16:1 (Parra et al., 2019). Actualmente continúan las investigaciones para optimizar la DA, los enfoques más escuchados son en el estudio del consorcio bacteriano y efectos de la temperatura.

2.2 Digestión anaerobia de residuos de comida

La DA puede tratar residuos de diferentes orígenes, como lo son aguas residuales municipales, aguas residuales de industrias principalmente de las agroalimentarias, lodo activado de reactores biológicos, ROC (residuos de comida, frutas, verduras, etc.), estiércol animal e inclusive influentes sintéticos elaborados para investigaciones de DA.

Comparando los influentes utilizados, los ROC tienen la ventaja de aportar una mayor variedad de nutrientes, lo que se puede traducir a la oportunidad de tener mejores rendimientos en los procesos de digestión (Li et al., 2013).

A continuación, se presenta una tabla resumen de distintas investigaciones de digestión anaerobia de ROC.

Tabla 1. Resumen de investigaciones de DA de ROC

Autor	Tipo de residuos	T_{op}, ºC	TRH, d	% Rem (SV)	Rendimiento de metano, L_{CH4}/kg-SV añadido @STP
Alcaraz-Ibarra (2019)	Receta sintética y lodo biológico de purga	20.24	40-120	59.9 – 74.6	200-270
Guilford et al. (2019)	Fibras de papel y cartón con ROC	37- 39	.15	20 – 69.4	67- 296
Gao et al. (2015)	ROC	41	45	42.8 – 48.4	190 - 375
Kinnunen et al. (2015)	ROC	37.32	72 -318	86- 96	379 - 466
Li et al. (2013)	ROC, rastrojo de maíz y estiércol de pollo	37	20	62 - 87	176 - 432
Méndez - Yunda (2020)	ROC y lodo activado de purga concentrado	20.4	60	58.9 – 74.4	250 – 300
Rusín et al. (2021)	ROC	21 - 40	52- 201	75.6	440 - 444
Tian et al. (2015)	ROC y estiércol de puerco (50%)	35	15 - 62	61 - 85.03	248 - 409
Zhang et al. (2012)	ROC	36	30	-	218 - 307

- No se presenta este dato en el artículo.

Como muestra la Tabla 1, la DA de ROC ha sido estudiada principalmente en condiciones mesofílicas, obteniendo resultados favorables respecto a los porcentajes de remoción de SV y el rendimiento de metano, confirmando así que este tipo de residuos son una opción viable para ser tratados por el proceso biológico de DA.

Después de la revisión de los artículos mostrados en la Tabla 1, se observó que la codigestión de los ROC es la opción más eficiente, debido a que la digestión única es poco estable debido a que los ROC por si solos no proporcionan una relación C/N

aceptable, generan una acumulación rápida de ácidos grasos volátiles y con ello la caída del pH del proceso, resultando en la acidificación rápida y la metanogénesis lenta (Gao et al., 2015).

Guilford et al. (2019) mencionaron que los residuos sólidos frescos de diferentes orígenes tienen un efecto sinérgico cuando se mezclan debido a la acción de las enzimas hidrolíticas que estos contienen, por ejemplo, las fibras de papel y cartón y los ROC tienen ciertos rendimientos cuando se digieren separadamente, pero al combinarlos en las proporciones adecuadas se genera el efecto de sinergia aumentando notablemente la producción de metano y degradando las fibras que durante su digestión única son muy difíciles de procesar.

Li et al. (2013) mostraron otro ejemplo de esta sinergia, evaluando la mono-digestión de estiércol y su codigestión con ROC. La mono-digestión de estiércol no fue favorable por la deficiencia de carbono y la baja biodegradabilidad, pero la codigestión con ROC pudo producir un efecto de sinergia debido a la contribución de nutrientes y al equilibrio que proporcionan en la relación C/N.

Los datos mostrados en la Tabla 1, en su mayoría corresponden a estudios realizados en temperaturas mesofílicas, en el caso de Rusín et al. (2021) realizaron una comparación de dos configuraciones de DA, en la primera crea un reactor de dos etapas en donde la temperatura de operación es psicrofílica y otro reactor en donde la temperatura es mesofílica, sin embargo, obtuvieron rendimientos de metano similares, por lo cual concluye que la digestión de ROC es viable y para su caso de estudio es conveniente un sistemas psicrofílico debido a que los requerimientos de energía son menores.

Rusín et al (2021) consideraron que la DA de ROC en condiciones psicrofílicas ha atraído una atención limitada y se puede encontrar muy poca o insignificante información en la literatura.

Alcaraz-Ibarra (2019) y Méndez-Yunda (2020) llevaron a cabo investigaciones de codigestión anaerobia con recetas de frutas y verduras junto con lodo activado de purga de un reactor biológico, obteniendo altos porcentajes de remoción de SV y rendimientos

específicos de metano favorables en temperaturas psicrofílicas en comparación con investigaciones a temperaturas mesofílicas.

A partir de las investigaciones mencionadas en la Tabla 1 podemos decir que la digestión de ROC es una rama importante por estudiar dentro del proceso de digestión anaerobia y que hasta ahora el proceso más estable es cuando se tratan los ROC en codigestión con otros sustratos. Además de que se puede llevar a cabo con distintos parámetros de operación, es decir, desde temperaturas psicrofílicas hasta mesofílicas y con distintos TRH y aun así tener REM similares. La investigación de DA de ROC tiene gran relevancia debido a las grandes cantidades de ROC que se generan, siendo una opción favorable para la revalorización de dichos residuos.

2.3 Efecto de la temperatura de operación en la digestión anaerobia

La temperatura de operación es un factor crítico en la DA, aunque se ha demostrado que se puede dar en condiciones psicrofílicas (< 25 ºC), mesofílicas (35 ºC) y termofílicas (55 ºC) (El-Mashad et al., 2004b). La temperatura de operación afecta el proceso de DA en dos ámbitos: el primero es que influye en la cantidad de energía de calentamiento del sistema y el segundo es que afecta significativamente la tasa de crecimiento de las bacterias anaerobias y, por lo tanto, la producción de metano (Arikan et al., 2015).

Existen diversas investigaciones que se han enfocado en estudiar cómo la temperatura de operación y su fluctuación afectan el proceso de DA:

El-Mashad et al. (2004b) operaron digestores a 60 y 50 °C y variaron la temperatura de operación 10 °C hacia abajo y 10 °C hacia arriba y encontraron que las fluctuaciones hacia arriba afectan la actividad metanogénica máxima más críticamente que cuando existen fluctuaciones hacia abajo. En condiciones termofílicas, la DA se vuelve menos estable, debido a que las fluctuaciones hacia arriba afectan el pH y la concentración de amoníaco. Al aumentar la temperatura, la concentración de amoníaco aumenta y por consecuencia modifica el pH del sistema; al salirse del rango de pH óptimo, la actividad de las bacterias metanogénicas se ve altamente afectada y con ello el rendimiento del sistema.

Arikan et al. (2015) estudiaron los rendimientos de digestores anaerobios de estiércol de vaca a dos temperaturas de operación (28 y 35 ºC) y encontraron que los digestores operados a 28 °C son casi tan eficientes como digestores que fueron operados a 35 °C. La producción de metano fue estadísticamente diferente entre ambos digestores, pero la producción de metano del digestor de 28 °C fue solamente el 87 % de la producción del digestor de 35 °C. Sin embargo, si los digestores se proyectaran a escala piloto, esta diferencia en la producción de metano no sería tan significativa como los requerimientos de calor que se necesitarían para mantener la temperatura de operación mesofílica. Arikan et al. (2015) consideraron que son necesarias más investigaciones para evaluar las fluctuaciones de temperatura en la producción de metano a bajas temperaturas de digestión en sistemas sin calefacción.

Álvarez & Lidén (2008) investigaron los efectos de las variaciones diarias de temperatura en el rendimiento de la DA. Variaron las temperaturas en tres rangos, el primero entre 11 y 25 °C, el segundo entre 15 y 28 °C y el tercero entre 19 y 32 °C, las variaciones de temperatura se realizaron de manera cíclica para simular las temperaturas ambientales, 12 horas la temperatura más baja y 12 horas la temperatura más alta.

Álvarez & Lidén (2008) consideraron que en zonas en donde no se puede costear un sistema de aislamiento o de calefacción, las fluctuaciones de la temperatura ambiente afectan la temperatura de operación y que el efecto de estas fluctuaciones en el proceso de DA ha sido poco investigado. Como resultado obtuvieron que el rendimiento de los digestores anaerobios operados a bajas temperaturas solo representó el 3% del rendimiento diario total, sin embargo, notaron que durante el tiempo que se aumentaba la temperatura de operación, la actividad de las bacterias en los digestores anaerobios fue inesperadamente alta. Los volúmenes de biogás producidos en este periodo fueron más de los que se esperarían con un digestor anaerobio a una temperatura alta constante durante 12 h. Concluyeron que las fluctuaciones causaron grandes variaciones cíclicas en la tasa de producción de biogás, y que la adaptación del sistema fue de entre 20 y 40 días, sugiriendo que la actividad metanogénica se conservaba durante el periodo de baja temperatura.

Wu et al. (2006) estudiaron el efecto de la disminución repentina de la temperatura (55 a 20 °C) de operación en la DA de ROC. Como resultado encontraron que la producción de biogás se afecta al punto de parar por completo a baja temperatura y que los ácidos grasos volátiles se acumulan rápidamente desencadenando en la disminución del pH. Concluyeron que las tres fases de la DA son afectadas por las fluctuaciones de temperatura y que los microorganismos termófilos eran muy resistentes a las fluctuaciones de temperatura.

A partir de la distinta bibliografía revisada se puede decir que la temperatura de operación representa un amplio campo a investigar para poder estabilizar y optimizar los procesos de digestión anaerobia.

2.4 Sistemas de calentamiento de digestores anaerobios

La temperatura de operación es uno de los factores más críticos en el proceso de DA, por ello distintos autores han abordado la temática de sistemas de calentamiento de digestores anaerobios.

El-Mashad et al. (2003) generaron un modelo matemático de utilización de energía solar durante la DA de estiércol bovino. Trabajaron con dos reactores calentados a 50 y 60 °C durante el día y el sistema de calentamiento se apagaba durante la noche, esto simulando las horas con radiación solar. Para estudiar el sistema de calentamiento se basaron en los resultados obtenidos en el reactor operado a 50 °C. El sistema de calentamiento que ellos proponen es de dos intercambiadores de calor, uno para elevar la temperatura del influente y otro para el calentamiento del digestor anaerobio. Describen la temperatura del reactor como la energía requerida para elevar la temperatura del influente, más la energía suministrada al digestor anaerobio por medio del intercambiador del calor, menos las pérdidas de calor de las paredes del digestor anaerobio hacia el ambiente.

Muestran diferentes cálculos basados en distintas configuraciones de aislamiento, diámetros y volúmenes de reactores, de acuerdo con estos los ladrillos aislados son muy efectivos y entre más pequeño sea el reactor mejor debe de ser el aislamiento por utilizar para tener ganancia de energía, por lo que los costos a invertir en un digestor pequeño

serían altos, en cambio, en reactores grandes, la mayor producción de energía térmica neta se encuentra en los reactores con mejores aislamientos. Entre más grande sea el reactor más ganancias de energía se tienen, independientemente del aislante. Presentan ideas acertadas, en ningún momento es realmente aplicado un sistema de calentamiento solar, y es importante considerar que la transferencia de energía puede cambiar significativamente y que hay factores que lo afectan como la radiación, el área de transferencia en el colector solar y la eficiencia de transferencia de los intercambiadores no es del 100%. Por tanto, no está describiendo de manera real como se comportaría el sistema de calentamiento, más bien el posible comportamiento respecto a los aislantes utilizados.

El-Mashad et al. (2004a), mejoraron el diseño de la incorporación de la energía solar a digestores anaerobios. Diseña un sistema de calentamiento solar, en donde ya realiza más consideraciones como el área de colector y las diferentes ganancias y pérdidas de calor posibles en el sistema, la máxima radiación posible y el ángulo óptimo para maximizar esta radiación. Lamentablemente este diseño solo queda en simulaciones, y no es aplicado, no hay resultados experimentales reales, que apoyen la idea de que el sistema está tomando en cuenta todas las consideraciones para aplicarlo en la vida real. Además, que se enfocan en el calentamiento dejando de lado los rendimientos de remoción y producción de biogás.

Zhong et al. (2015) presentaron una idea más estructurada de los sistemas de calentamiento solar aplicados a los digestores anaerobios, al análisis que realizan está basado en la radiación de cada día por hora, por lo tanto, los cálculos son más aplicados a la realidad. El sistema que proponen se basa en un intercambiador que calienta el influente y agua en recirculación dentro del digestor anaerobio, el fluido del intercambiador de calor es agua que se calienta con ayuda de un colector de energía térmica solar. De acuerdo a la época del año, existen variaciones en los requerimientos energéticos del sistema, por tanto las áreas de los colectores solares varían conforme a estos requerimientos, obteniendo así que durante invierno se utilizarían áreas de colectores solares muy grandes y en verano áreas pequeñas, por tanto, es necesario tener otro factor para decidir el área de colector óptima que sea aplicable durante todo al

año, debido que en una aplicación real el área del colector solar es fija, y no se pueden aumentar o disminuir durante el año, lo que representa gastos monetarios.

Zhong et al. (2015) realizaron una proyección para digestores anaerobios de 10, 100 y 1000 $m^{3,}$ en donde muestran que entre mayor sea el volumen del digestor anaerobio, mayor es la eficiencia del sistema de calentamiento solar y menor es el área de colector solar requerida, dando entender de esta forma, que los requerimientos de energía disminuyen al aumentar el volumen del digestor anaerobio.

Zupančič & Ros (2003) mencionaron los requerimientos de calor en un digestor anaerobio, el cual estaba en contacto con el aire, el suelo y el subsuelo y presentaron una ecuación para calcular las pérdidas de calor del digestor anaerobio hacia el ambiente a través de las paredes y otra para calcular el calor necesario para elevar la temperatura del influente a la temperatura de operación, las cuales se muestran a continuación.

Ecuación 1, pérdidas de calor en el digestor anaerobio:

$$Q_c = k_{c\,aire} * A_{c\,aire}(T_{op} - T_{amb}) + k_{c\,suelo} * A_{c\,suelo}(T_{op} - T_{amb}) + k_{c\,asub} * A_{c\,asub}(T_{op} - T_{amb})$$

Donde:
Q_c: pérdidas de calor del digestor (W)
$k_{c\,aire}$, $k_{c\,suelo}$, $k_{c\,sub}$: coeficientes de trasferencia de calor (W/m^2 K)
$A_{c\,aire}$, $A_{c\,suelo}$, $A_{c\,sub}$: áreas de la pared (m^2)
T_{op}: temperatura de operación del digestor anaerobio (K)
T_{amb}: temperatura ambiental (K)

La ecuación se ajusta a la configuración del digestor, es decir, material de construcción, dimensiones, aislantes y contacto con el ambiente.

Ecuación 2, calor necesario para llevar el influente a la temperatura de operación:

$$Q_s = \dot{m}_s * c_{ps}(T_{op} - T_s)$$

Donde:
Q_s: calor necesario para calentar el influente (J/d)
$\dot{m}_s$: flujo másico del influente (kg/d)
C_{ps}: calor específico del influente (J/kg *K)
T_{op}: temperatura de operación del digestor anaerobio (K)
T_S: temperatura inicial del influente (K)

De acuerdo con los resultados mostrados por Zupančič & Ros (2003) las pérdidas de calor a través de las paredes del digestor anaerobio solo representan entre el 2 y el 8 % del calor necesario para el calentamiento de influente aun cuando se habla de un digestor anaerobio operado a temperaturas termofílicas y temperaturas ambiente por debajo de los 20 °C. Esto da un mayor entendimiento de la importancia de un buen aislante como parte del sistema de calentamiento. Sin embargo, también es importante resaltar que los coeficientes que se utilizan son pequeños en comparación a otras fuentes. Da una pauta importante para el análisis real al momento de querer llevar un sistema de calefacción a plantas piloto.

Zupančič & Ros (2003), mostraron que entre más grande sea el digestor anaerobio los requerimientos de energía son menores tanto para compensar las pérdidas de calor del digestor como para el precalentamiento del influente, inclusive cuando el digestor anaerobio se opere a temperaturas termofílicas y la temperatura ambiental este en rangos psicrofílicos, es decir, muestran que un sistema de calentamiento solar puede generar la energía necesaria para vencer esta gran diferencia de temperatura.

Zhang et al. (2016) mostraron una configuración más compleja en donde el sistema de calentamiento es hibrido, hacen utilización del biogás producido y de la energía solar. El sistema constaba de tres digestores aislados enterrados y en paralelo por donde circulaba agua que se calentaba en una caldera que usa biogás y el agua calentada por una serie de colectores solares. Como resultados obtuvieron que de tener temperaturas de operación menores de 10°C pueden alcanzar una temperatura de operación de 19 - 20 °C, por tanto, al aumentar la temperatura de operación en el digestor también tuvieron efectos favorables en la producción de biogás, aunque su producción de biogás con o sin calentamiento es baja respecto a los autores presentados en la Tabla 1. Además, el

diseño del sistema de calentamiento es empírico y no se realizan análisis energéticos del sistema.

Después de revisar la literatura podemos concluir que existe mucho trabajo de investigación a realizar tanto experimental como teórico, para la aplicación de sistemas de calentamiento y su optimización para realizar un aprovechamiento óptimo de la energía disponible.

3. JUSTIFICACIÓN CONTEXTUAL Y CIENTÍFICA

De acuerdo con cifras del INEGI en México fueron recolectados 106,523,139 kg de residuos sólidos urbanos diariamente durante el 2020 (INEGI, 2022). SEMARNAT reporta que solo el 9.63% de los residuos generados son reciclados (SEMARNAT, 2017).

Los residuos orgánicos representan el 50% de los residuos sólidos urbanos generados (De Anda, 2021), las cocinas de los hogares son una fuente importante de generación de residuos sólidos orgánicos (RSO), los cuales son en su mayor parte llevados a rellenos sanitarios como disposición final, es decir, la sociedad no les da un valor agregado como a otros residuos como el PET o el aluminio.

La disposición de residuos orgánicos en rellenos sanitarios crea problemáticas ambientales, debido a su descomposición biológica, generando malos olores, gases de efecto invernadero y lixiviados, contribuyendo al calentamiento global y a la contaminación de aguas subterráneas por la filtración de estos lixiviados.

La DA es una excelente alternativa para el tratamiento de este tipo de residuos, dotándolos de un mayor valor agregado al ser la principal materia prima para la producción de una energía limpia en forma de biogás y así mismo se aumentaría el tiempo de vida útil de los rellenos sanitarios.

Se ha comprobado que la temperatura ideal de operación en la digestión anaerobia es de 35°C y que las fluctuaciones de temperatura de operación afectan la estabilidad del sistema, sin embargo, el equipo de trabajo (Alcaraz-Ibarra, 2019; Méndez-Yunda, 2020; Moncivais-Gómez, 2023) ha investigado la digestión anaerobia de ROC en condiciones psicrofílicas obteniendo resultados de REM favorables en comparación a investigaciones en condiciones mesofílicas. Por ello se considera que se puede aumentar aún más el REM controlando el factor temperatura, con ayuda de un sistema de calentamiento que aumente la temperatura de operación del digestor anaerobio.

Los estudios actuales sobre calentamiento de digestores anaerobios se basan en crear sistemas de calentamiento con energía solar y con el biogás producido, lamentablemente estos estudios con sistemas de calentamiento con energía solar son aún teóricos y sus simulaciones no se comprobaron con estudios de laboratorio o de campo.

Los objetivos actuales de la DA es tener un proceso eficiente, rentable, estable y viable, por tanto, es momento de llevar a la práctica la aplicación de sistemas de calentamiento para optimizar el proceso, y que la temperatura de operación no sea una problemática para llevar a cabo la DA en cualquier parte del mundo, en donde la temperatura ambiental no alcanza los 35 °C, como lo es el caso de la ciudad de Toluca.

4. HIPÓTESIS

Al incrementar la temperatura de operación en un digestor anaerobio con la energía térmica de su biogás producido, se incrementará en un 50% el rendimiento específico del metano, respecto a un digestor sin ningún sistema de calentamiento.

5. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

5.1 Objetivo general

Incrementar en un 50% el rendimiento específico de metano de un digestor anaerobio escala casera con un sistema de calentamiento que utiliza su biogás producido, respecto a un digestor sin ningún sistema de calentamiento.

5.2 Objetivos específicos

a) Diseñar y construir un digestor anaerobio escala casera de 140 L y un sistema de calentamiento que utilizará su biogás producido.
b) Optimizar el sistema digestor/calentador con la finalidad de aprovechar al máximo la energía térmica del biogás producido.
c) Evaluar el rendimiento global del digestor anaerobio de escala casera (eficiencia de remoción de sólidos, producción diaria de biogás, porcentaje de metano, rendimiento específico de metano) y del sistema de calentamiento (eficiencia de transferencia de energía y pérdidas de calor).
d) Analizar estadísticamente los resultados del rendimiento global del digestor.

6. METODOLOGÍA

6.1 Operación de un Reactor de lodos activados

El LAP que se utilizó para la preparación del sustrato de codigestión se obtuvo de un reactor piloto de lodos activados de un volumen efectivo de 200 L como el que se muestra en la **Figura 1.**

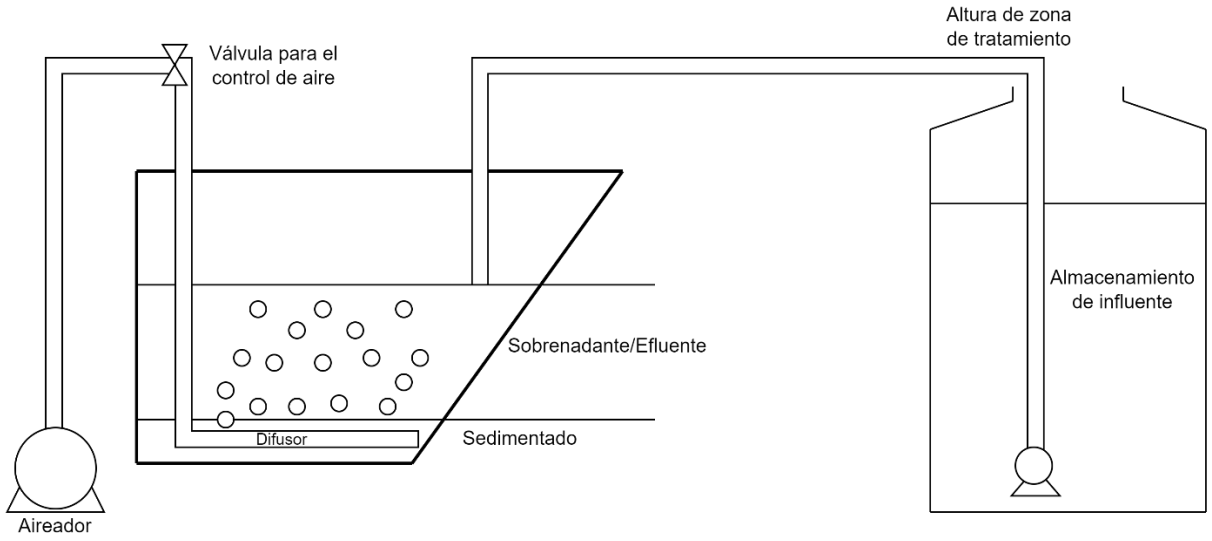


Figura 1. Reactor piloto de lodos activados de 200 L ocupado para la obtención de lodo activado de purga

El reactor se operó con tiempos de 2 h de sedimentación; 0.4 h para retiro de efluente el cual se realizó con ayuda de un sifón; 0.1 h de llenado el cuál se realizó con ayuda de una bomba de electro nivel y 21.5 h de aireación. El influente con el cual fue alimentado era agua residual que provenía de una industria chocolatera diluida a una concentración promedio de 1000 mg/L de DQO, diariamente se alimentaron 140 L de este influente, es decir, se trabajó con un TRH de 34 h.

Para la obtención del LAP concentrado diariamente antes de iniciar la sedimentación se retiraron 5 L de licor mixto del reactor, el cual se dejó sedimentar por 24 horas, pasado este tiempo se retiró el sobrenadante y el lodo obtenido se reservó para la preparación del sustrato de codigestión.

6.2 Preparación de sustrato de codigestión

El sustrato de codigestión estuvo compuesto de LAP concentrado y ROC en una proporción 1:4, respectivamente. Para su preparación, en una licuadora marca OSTER se licuaron 200 mL de LAP concentrado y los ROC picados en pedazos pequeños, hasta completar 1 L de mezcla.

Los ROC fueron recolectados de casas de los integrantes del equipo de trabajo, y su preparación se realizó 2 veces por semana, y se mantuvo a temperatura ambiente hasta su utilización. Los ROC utilizados fueron variados (residuos de frutas y verduras en su mayoría), evitando grasas y harinas, y máximo un 10% de cítricos (esto debido a sus propiedades antibacterianas).

6.3 Operación de un digestor anaerobio de 160 L

Para la realización de las pruebas preliminares de calentamiento de agua que se muestran en la sección 6.4, fue necesario operar un digestor anaerobio (**Figura 2**) para la obtención de biogás.

El digestor anaerobio fue de un volumen efectivo de 160 L, el cual fue alimentado de lunes a jueves con 3 L diarios y los viernes con 6 L de sustrato de codigestión para obtener un TRH de 53.34 d.

El digestor de 160 L no contó con algún tipo de aislante y se operó en el laboratorio de modelos hidráulicos (LMH) del IITCA en donde la temperatura ambiental promedio es de 17 °C.

Para realizar la alimentación, primero se cerró la válvula de biogás y posteriormente se retiró el tapón en el tubo A, se colocó un embudo y se ingresó el sustrato de codigestión. Posteriormente utilizando un tubo como pistón se empujó el sustrato de codigestión y de esta forma se mezcló con el contenido dentro del digestor anaerobio. El efluente se recolectó por la salida C, se midió su temperatura con ayuda de un termómetro de alcohol y posteriormente se almacenó. Al terminar la alimentación y recolección del efluente se abrió la válvula de biogás.

El biogás producido se midió con un medidor de gas marca ELSTER AMCO modelo BK-G1.6 y se almacenó en un contenedor de caucho de 150 L (cámara de llanta de camión).

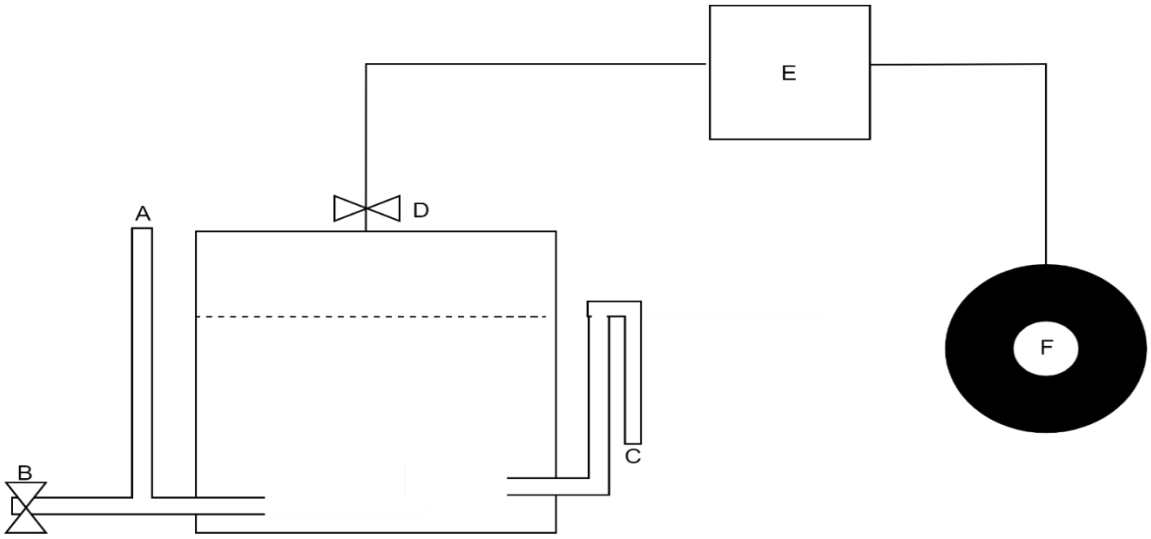


Figura 2. Digestor anaerobio de 160 L. A = Entrada de influente, B = Salida de efluente alterna, C = Salida de efluente, D = Salida de biogás, E = Medidor volumétrico de biogás, F = Almacenamiento de biogás

6.4 Pruebas preliminares de calentamiento de agua

Debido a que el aprovechamiento de la energía contenida en el metano del biogás no se había realizado en este grupo de investigación, se inició por hacer pruebas preliminares de calentamiento de agua con el biogás producido con un digestor anaerobio de 160 L (sección 6.3).

En agosto del 2023 se iniciaron las pruebas preliminares de calentamiento de agua utilizando el sistema descrito en la **Figura 3.**

Se diseñó y construyó un sistema de calentamiento que estuvo compuesto por una cámara de combustión de madera de triplay (0.3 x 0.3 x 0.45 m), aislada con 5 cm de poliestireno expandido. Dentro de la cámara de combustión se colocó un mechero Bunsen para calentar 1 L de agua contenido en un matraz Erlenmeyer. El matraz estuvo conectado a un circuito cerrado compuesto por una mini bomba de diafragma marca

KEYUKANG y un serpentín de cobre colocado dentro de la hielera o contenedor con agua.

El biogás producido al salir del digestor anaerobio pasaba primero por un sello hidráulico, seguido de un medidor de gas y finalmente se almacenaba en un contenedor de caucho de 150 L. La cámara de combustión estaba instalada después del contenedor de caucho para la quema del biogás con el mechero Bunsen. La mini bomba de diafragma mandaba el agua del matraz al intercambiador de calor (serpentín de cobre) que estaba sumergido dentro de la hielera de 50 L o contenedor de 140 L. El flujo de la mini bomba de diafragma fue de 0.3 L/min.

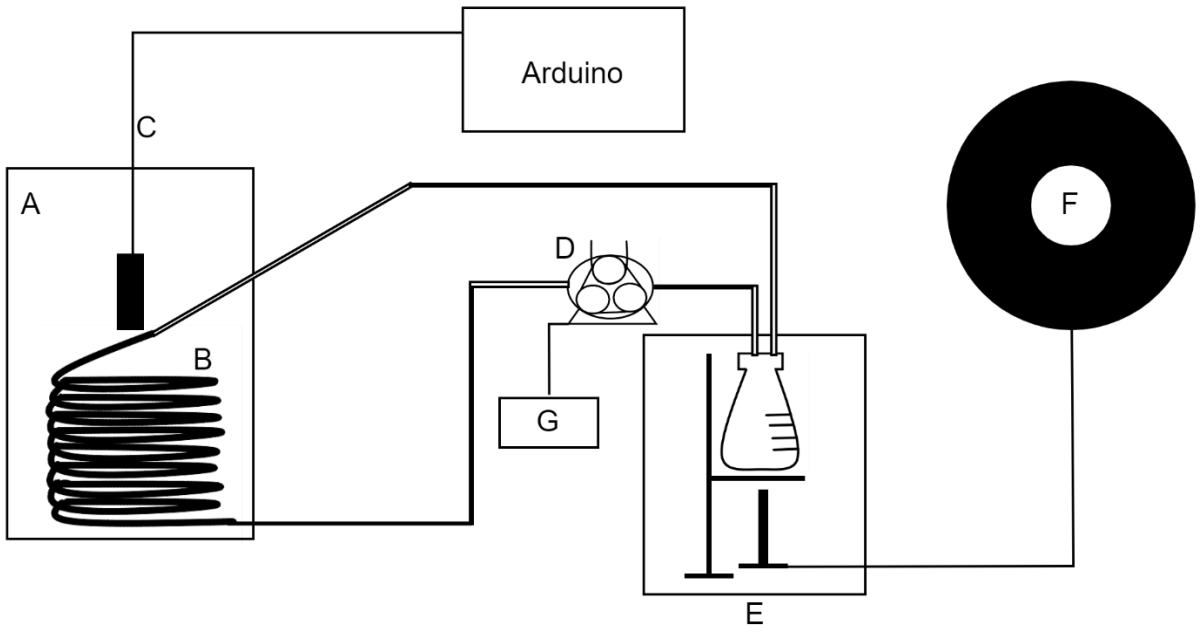


Figura 3. Sistema de calentamiento (Pruebas preliminares). A = Hielera/contenedor con agua, B = Serpentín de cobre, C = Sensor de temperatura, D = Mini bomba de diafragma, E = Cámara de combustión (mechero Bunsen y matraz Erlenmeyer de 1 L), F = Contenedor de caucho, G = Temporizador

Debido a que no se quería invertir energía en el bombeo de biogás almacenado en el contenedor de caucho hacia el mechero, el flujo de biogás se controló poniendo peso sobre el contenedor de caucho (contenedores de 6 y 4 L de agua). El flujo de biogás del mechero Bunsen se comportó de diferentes maneras debido a que la producción diaria

de biogás no era suficiente para mantenerlo encendido las 24 h del día. Estos detalles de operación se darán en la sección de resultados.

Respecto al monitoreo de temperatura se colocó un sensor de temperatura dentro de la hielera/contenedor con agua para el registro de la temperatura interna y otro sensor al exterior para el monitoreo de la temperatura ambiental.

El sistema de calentamiento, así como su operación se fueron modificando con el propósito de implementar mejoras en el trascurso de las pruebas preliminares de calentamiento. En las siguientes secciones se describen las distintas etapas que se llevaron a cabo durante las pruebas preliminares de calentamiento.

6.4.1 Calentamiento en una hielera de 50 L utilizando un serpentín de cobre de 3/8” de diámetro y 5 m de longitud

Las pruebas de calentamiento se iniciaron en una hielera marca Rubbermaid de 50 L, y con un serpentín de cobre de 3/8” de diámetro y 5 m de longitud. La recirculación del agua del matraz hacia el serpentín se realizó las 24 h del día con ayuda de una mini bomba de diafragma.

Posteriormente el funcionamiento de la mini bomba de diafragma se controló con un temporizador digital marca STEREN modelo TEMP-20E, se trabajó con la configuración de 20 ciclos de recirculación de 15:00 a 9:00 h. Cada ciclo consistió en 40 min con la bomba apagada y 20 min con la bomba encendida, esto con el propósito de evitar el sobrecalentamiento de la bomba y también para permitir que el agua del matraz se calentará y después realizar la transferencia de calor a través del serpentín de cobre.

6.4.2 Calentamiento en un contenedor de 140 L, sin aislante y con un serpentín de 5 m y 20 ciclos de calentamiento

Con el objetivo de hacer las pruebas preliminares de calentamiento en un volumen igual al digestor anaerobio a utilizar, se decidió cambiar la hielera de 50 L por un contenedor de 140 L, sin ningún tipo de aislante y con los 5 m de serpentín de cobre de 3/8”, se mantuvieron los 20 ciclos de recirculación de agua de 15:00 a 9:00 h.

6.4.3 Calentamiento en un contenedor de 140 L, con aislante y con un serpentín de 18 m, y 20 ciclos de calentamiento

En la siguiente etapa de pruebas preliminares de calentamiento de agua se aisló el recipiente de 140 L con una capa de 5 cm de fibra de vidrio y una capa plástica de polietileno de baja densidad (bolsas negras de basura). Se cambió el serpentín de 5 m por uno de cobre de 18 m y un diámetro de 3/8", se continuó con la operación de 20 ciclos de recirculación de 15:00 a 9:00 h.

6.4.4 Calentamiento en un contenedor de 140 L, con aislante y con un serpentín de 18 m, y 6 ciclos de calentamiento

Como ultima configuración en las pruebas preliminares de calentamiento se continuó con el recipiente de 140 L aislado con fibra de vidrio y la capa de plástica, el serpentín de cobre de 18 m y se cambió la operación a 6 ciclos de recirculación de agua de 9:00 14:00 h de lunes a jueves y el fin de semana se mantuvieron los 20 ciclos de recirculación.

6.5 Sistema digestor anaerobio escala casera/calentador

La **Figura 4** muestra un diagrama del sistema digestor anaerobio/calentador. Se diseñó y construyó un digestor anaerobio de escala casera (DAEC) de 140 L de volumen efectivo con un recipiente de plástico de 160 L de volumen total. Para reducir las pérdidas de calor al medio ambiente, el DAEC se aisló con dos capas de 5 cm de fibra de vidrio y dos capas plásticas de polietileno de baja densidad, intercaladas entre sí, siendo la primera capa de fibra de vidrio y la ultima la capa plástica. La concentración inicial de SV del lodo dentro del digestor fue el 18 g-SV/L.

La entrada y salida de sustrato del DAEC fueron de PVC de 2" de diámetro. La salida del biogás del DAEC fue de PVC de 1" de diámetro y la tubería de conexión de la salida de biogás al medidor de gas tipo tambor marca Ritter TG 0.5 y al contenedor de caucho fue de goma de látex de 0.65 cm de diámetro.

Cuando el sistema de calentamiento estuvo en operación, la cámara de almacenamiento liberó el biogás hacia el mechero Bunsen que se encontraba dentro en la cámara de combustión; el agua del matraz Erlenmeyer se calentó y se recirculó con una mini bomba de diafragma hacia el serpentín de cobre de 18 m de longitud y 3/8” de diámetro colocado dentro del DAEC.

La temperatura del sistema digestor/calentador se monitoreó con dos sensores de temperatura: uno dentro del digestor y otro al exterior para monitorear la temperatura ambiente. Dichos sensores de temperatura estuvieron conectados a un sistema Arduino para el almacenamiento continuo de estos datos.

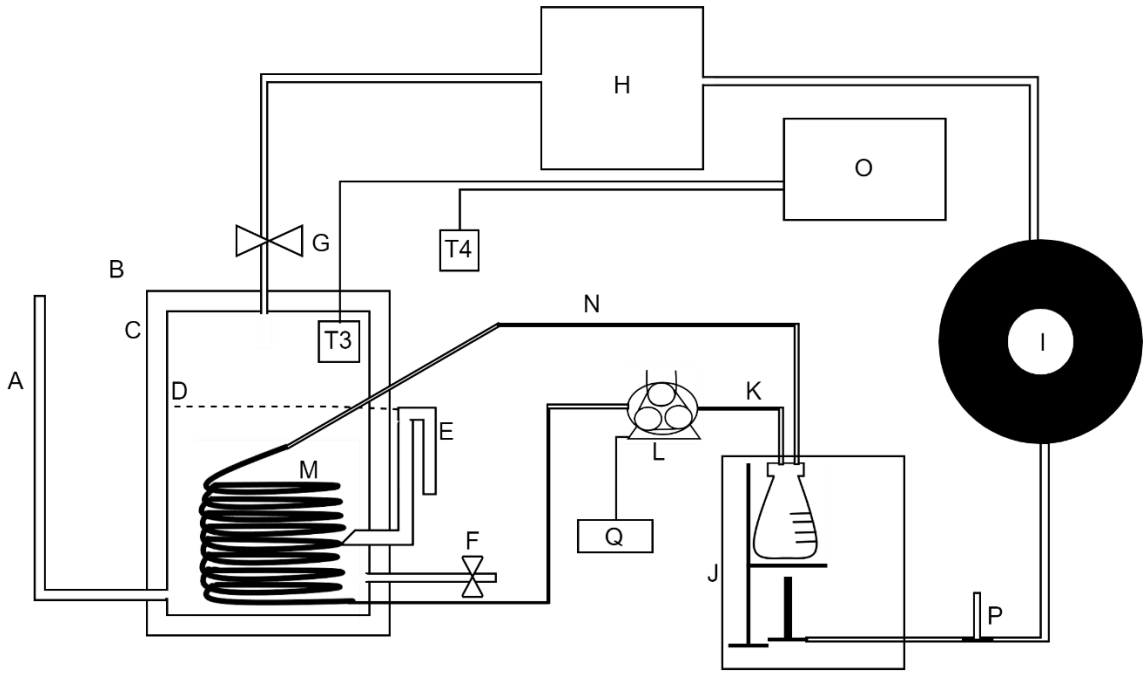


Figura 4. Configuración del sistema digestor anaerobio/calentador. A = Entrada de alimentación del influente, B = Capa de polietileno de baja densidad, C = Fibra de vidrio, D = Digestor anaerobio de 140 L, E = Salida de efluente, F = Salida alterna de efluente, G = Válvula de salida de biogás, H = medidor volumétrico de biogás, I = cámara de almacenamiento de biogás, J = Cámara de combustión, K = Salida de agua del intercambiador, L = Mini bomba de diafragma, M = Intercambiador de calor o serpentín de cobre, N = Salida de agua del intercambiador, O = Sistema Arduino, P= Controlador de flujo de biogás, Q = Temporizador y T1, T2 = Sensores de temperatura

6.6 Operación de un digestor anaerobio escala casera de 140 L

La operación del digestor anaerobio de 140 L se dividió en tres corridas experimentales, estas con base en las tres configuraciones de calentamiento que se emplearon, debido a que el comportamiento y rendimiento del digestor anaerobio se vieron influenciados por el modo de calentamiento.

El DAEC durante la primera y segunda corrida experimental se operó a un tiempo de retención hidráulico (TRH) constante de 60 d. Considerando este TRH, un volumen efectivo de 140 L y una concentración de 80 g-SV/L, la carga orgánica volumétrica aplicada y el gasto de alimentación fueron de 1.33 g-SV/L/d y 2.33 L/d, respectivamente. De acuerdo con investigaciones previas con este tipo de DAEC (Alcaraz-Ibarra, 2019; Méndez-Yunda ,2020; Monsiváis-Gómez, 2023), éstas son condiciones efectivas para la operación de un digestor anaerobio.

En una tercera corrida experimental se cambió el gasto de alimentación a 1 L/d, es decir un TRH de 140 d y una carga orgánica volumétrica de 0.57 g-SV/L/d, esto debido a que el digestor anaerobio se acidifico durante la segunda corrida experimental, por lo que se tuvo que volver a inocular con efluente de digestores del equipo de trabajo, y se operó con una carga baja para evitar su desestabilización.

El DAEC se alimentó diariamente con sustrato de codigestión de lunes a viernes a temperatura ambiente. En cada alimentación como primer paso se cerró la válvula de salida de biogás, posteriormente se retiró el tapón del tubo de entrada; en la salida se colocó un recipiente para la recolección del efluente; con ayuda de un embudo se ingresó el sustrato de codigestión y después se utilizó un pistón para bajar la comida y lograr que ésta se mezclará con el contenido dentro del digestor. Para finalizar se colocó de nuevo el tapón de la entrada y se abrió la válvula de salida de biogás.

Se tomó una muestra del influente (sustrato de codigestión) y efluente del DAEC diariamente para medir sólidos totales y volátiles, pH y temperatura. El volumen de biogás acumulado se registró con un medidor de gas tipo tambor marca Ritter (TG 0.5) cada quince minutos con la ayuda de una cámara DSLR Canon EOS Rebel T5. La producción horaria y diaria de biogás se calculó con los registros de volumen acumulado y hora en

que se tomó la fotografía ($Q = \Delta V/\Delta t$). El porcentaje de metano del biogás producido se midió diariamente con el método de adsorción en NaOH.

6.7 Calentamiento de un digestor anaerobio escala casera de 140 L

El siguiente paso después de las pruebas preliminares de calentamiento de agua fue el calentamiento del digestor de 140 L, para lo cual se experimentaron con distintas configuraciones respecto a los tiempos de calentamiento lo cual se describe en las siguientes secciones.

6.7.1 Calentamiento de un digestor anaerobio escala casera de 140 L con 6 ciclos de calentamiento

En la primera configuración para el calentamiento del digestor anaerobio de 140 L se trabajó con ciclos de 9:00 a 15:00 h estando 40 min. apagada la mini bomba de diafragma y 20 min. encendida de lunes a viernes. Los fines de semana (sábado y domingo) no se calentaba y únicamente se almacenaba el biogás producido. El objetivo del empleo de ciclos resultó de las pruebas preliminares de calentamiento y fue evitar el calentamiento de la bomba.

6.7.2 Calentamiento de un digestor anaerobio escala casera de 140 L con calentamiento continuo de 6 horas

Se experimento con una segunda configuración de calentamiento en donde la mini bomba de diafragma se remplazó por una bomba de peristáltica MASTERFLEX ® LS ® Mod. 77200-12, esto con la finalidad de trabajar con un calentamiento continuo por 6 horas (9:00 – 15:00 h).

6.7.3 Calentamiento de un digesto anaerobio escala casera de 140 L con calentamiento continuo 24 h al día

Una tercera configuración consistió en el calentamiento continuo 6 días a la semana, desde el lunes a las 9:00 h hasta los domingos a las 9:00 h, con un flujo de recirculación de 50 mL/min y un flujo de biogás de 100-150 mL/min quemado en el mechero Bunsen.

6.8 Métodos analíticos

En la Tabla 2 se muestran los métodos analíticos que se realizaron para determinar los parámetros para caracterizar al sustrato de codigestión, efluente y biogás.

Al sustrato de codigestión y al efluente se le realizaron pruebas de pH, temperatura y sólidos totales y volátiles, cada prueba se realizó diariamente.

Diariamente por la mañana se medió el porcentaje de metano contenido en el biogás.

Tabla 2. Métodos de prueba a realizar al sustrato de codigestión, efluente y biogás

Parámetro	Método analítico
pH	NMX-AA-008-SCFI-2016 Análisis de agua. - Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. - Método de prueba (DOF, 2016).
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2013 Análisis de agua – Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (DOF, 2013).
Sólidos totales y volátiles	NMX-AA-034-SCFI-2015 Análisis de aguas-Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba (DOF, 2015).
Porcentaje de metano en el biogás	Método de adsorción de CO_2 en NaOH (Loosdrecht et al., 2016).

6.9 Cálculos

A partir de los resultados de las distintas mediciones se determinarán parámetros como flujo de metano, porcentajes de remoción de SV, flujos másicos, cargas orgánicas volumétricas, producción volumétrica de biogás y metano, producción teórica de metano @STP y producción real de metano; a partir de las siguientes ecuaciones.

a) Flujo alimentación:

$$Q = \frac{V}{TRH}$$

Donde:
Q: flujo de alimentación (L/d),
V: volumen de trabajo (L) y
TRH: tiempo de retención hidráulico

b) Producción de metano medido:

$$PM = PB * \%\, CH_4$$

Donde:
PM: Producción de metano medido (L_{CH4}/d),
PB: Producción de biogás medido (L/d) y
% CH_4: porcentaje de metano

c) Volumen de biogás y metano a condiciones estándar de presión y temperatura:

$$V_{STP} = V_{op} * \frac{P_{op}}{P_{STP}} * \frac{273.15 + T_{STP}}{273.15 + T_{op}}$$

Donde:
V_{STP} : volumen a condiciones estándar de presión y temperatura (L),
V_{op} : volumen en las condiciones de operación (L),
P_{op} : presión de operación (0.73 atm),
P_{STP} : presión estándar para gases (1 atm),
T_{STP} : temperatura a condiciones estándar (0 °C) y
T_{op} : temperatura de operación (°C)

d) Porcentaje de remoción de SV:

$$\%Rem\ SV = \frac{C_{inf} - C_{efl}}{c_{inf}} * 100\%$$

Donde:
%Rem SV: porcentaje de remoción de SV,
C_{inf}: concentración de SV en el influente (g-SV/L) y
C_{efl}: concentración de SV en el efluente (g-SV/L)

e) Flujo másico:

$$\dot{m}s = Q * C_{inf}$$

Donde:
ms: flujo másico (g/d)
Q: flujo de alimentación o caudal (L/d) y
C_{inf}: concentración de SV en el influente (g-SV/L)

f) Carga orgánica volumétrica:

$$COV = \frac{(Q * C_{inf})}{V_r}$$

Donde:
COV: carga orgánica volumétrica (g/d * L),
Q: flujo de alimentación o caudal (L/d),
c_{inf}: concentración de SV en el influente (g-SV/L) y
V_r: volumen del reactor (L)

g) Producción volumétrica de biogás/metano:

$$PVM = \frac{PM}{V_r}$$

$$PVB = \frac{PB}{V_r}$$

Donde:
PVM: producción volumétrica de metano (L/d*L),
PVB: producción volumétrica de biogás (L/d*L),
PM: producción de metano medido (L/d),
PB: producción de biogás medido (L/d) y
V_r: volumen del reactor (L)

h) Producción de metano teórica @STP:

$$PM_{teo@STP} = \dot{m}s * 0.35 \frac{L_{CH_4}}{g - DQO} * 1.42 \frac{g - DQO}{g - SV}$$

Donde:
$PM_{teo@STP}$: producción de metano teórica @STP (L_{CH4}/d) y
ms: flujo másico (g-SV/d)

i) Producción de biogás teórica considerando el % Rem de SV y el 60% de metano @STP:

$$PB_{teo@STP} = \frac{PM_{teo@STP} * \%\ Rem * 100}{60}$$

Donde:
$PB_{real@STP}$: producción de biogás real @STP (L_{CH4}/d)

$PM_{teo@STP}$: producción de metano teórica @STP (L_{CH4}/d) y
%Rem: porcentaje de remoción

j) Energía teórica del biogás

$$ETB = \frac{PB_{real@STP} * PC}{86400 \frac{s}{d}}$$

Donde:
ETB: energía teórica del biogás (W)
$PB_{real@STP}$: producción de biogás real @STP (L_{CH4}/d) y
PC: poder calorífico del biogás (19,930 kJ/m^3-CH_4), (SENER,2021)

k) Coeficiente de transferencia de calor global:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{k_{in}} + \sum \frac{e}{k_{mat}} + \frac{1}{k_{out}}}$$

Donde
k: coeficiente de transferencia de calor global (W/m^2*K),
k_{in}: coeficiente de transferencia por conducción (W/m^2*K),
e: espesor de los materiales aislantes (m),
k_{mat}: coeficiente de transferencia de calor de los materiales aislantes (W/m*K) y
k_{out}: coeficiente de transferencia de calor por convección hacia el ambiente (W/m^2*K)

l) Cálculo de la altura del digestor anaerobio:

$$H = \frac{(2Z)^2 * V_r}{\pi^{\frac{1}{3}}}$$

Donde:
H: altura del digestor anaerobio (m),
Z: relación altura/diámetro y
V_r: volumen del reactor (m^3)

m) Diámetro del digestor anaerobio:

$$D = \frac{H}{Z}$$

Donde:
D: diámetro del digestor anaerobio (m),
Z: relación altura/diámetro y
H: altura del digestor anaerobio (m)

n) Área superficial del digestor anaerobio:

$$AS = 2\pi(\frac{D}{2})^2 + \pi HD$$

Donde:
AS: área superficial del digestor anaerobio (m^2),
H: altura del digestor anaerobio (m) y
D: diámetro del digestor anaerobio (m)

o) Balance de energía global:

$$Q_T = ETB - Q_S - Q_C$$

Donde:
QT: energía total disponible (W),
ETB: Energía teórica del biogás (W)
Q_s: energía requerida para calentar el influente a la temperatura de operación (W) y
Q_c: energía requerida para contrarrestar las pérdidas de calor a través de las paredes del digestor anaerobio (W)

6.10 Análisis estadístico

Como programa principal de análisis estadístico se utilizó Excel. En primera estancia para generar una base de datos en donde se realizó un análisis teórico de los requerimientos de energía y un balance global de energía, en donde se pueden modificar los parámetros como concentración inicial, temperaturas, aislantes, etc.

Además, se realizaron bases de datos del biogás y metano producido en condiciones de presión y temperatura de Toluca, y en condiciones estándar. Se obtuvieron promedios diarios y desviaciones estándar de PB, PM, REM, SSV_{apli}, SSV_{rem}, COV y porcentajes de remoción.

Los resultados obtenidos se compararon con resultados de experimentaciones anteriores, en donde no se utiliza un sistema de calentamiento, con el fin de evaluar si el REM mejora con el sistema de calentamiento.

7. RESULTADOS

7.1 Estudio teórico de requerimientos de energía de digestores anaerobios a distintas escalas

Como un análisis inicial se realizó un estudio teórico de los requerimientos de energía de digestores anaerobios a diferentes escalas. Los datos iniciales para considerar se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Datos iniciales para el estudio teórico de requerimientos de energía

Concentración de SV =	80	g/L						
Porcentaje de remoción de SV = %Rem =	70%							
Volumen del reactor (L) =	10	100	140	500	1000	5000	10000	
Tiempo de retención hidráulico (d) =	40	60	80	100	120			
Temperatura de operación (°C) =	25							
Temperatura ambiente (°C) =	18							
Temperatura del influente(°C) =	18							
Calor específico del lodo anaerobio =	4.2	kJ/kg*°C						
Rendimiento de metano en DQO =	0.35	L_{CH4}/g-DQO						
Rendimiento de metano en SV =	0.497	L_{CH4}/g-SV						
Poder calorífico del biogás* =	19,930	kJ/m^3-biogás						

*SENER (2021)

Como primer paso se calculó el flujo o caudal de alimentación, esto dividiendo el TRH sobre el volumen de reactor y se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Flujo o gasto de alimentación (L/d) para digestores a distintas escalas y TRH´s

↓ TRH (d) / V (L)→	10	100	140	200	500	1000	5000	10000
40	0.25	2.50	3.50	5.00	12.50	25.00	125.0	250.0
60	0.17	1.67	2.33	3.33	8.33	16.67	83.3	166.7
80	0.13	1.25	1.75	2.50	6.25	12.50	62.5	125.0
100	0.10	1.00	1.40	2.00	5.00	10.00	50.0	100.0
120	0.08	0.83	1.17	1.67	4.17	8.33	41.7	83.3

A partir del gasto de alimentación para cada caso se calculó el biogás teórico producido, considerando un porcentaje de remoción de SV del 70%, un porcentaje de metano del 60% y una producción teórica de metano de 0.497 L_{CH4}/g-SV y se obtuvieron como resultado los datos mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Biogás teórico producido ($PB_{teo@STP}$) considerando el 70% de remoción de SV

↓ TRH (d)/ V (L) →	10	100	140	200	500	1000	5000	10000
40	11.60	115.9	162.3	231.93	579.8	1159.6	5798.3	11596.6
60	7.73	77.3	108.2	154.62	386.5	773.1	3865.5	7731.1
80	5.80	57.9	81.1	115.97	289.9	579.8	2899.1	5798.3
100	4.64	46.3	64.9	92.77	231.9	463.8	2319.3	4638.6
120	3.87	38.6	54.1	77.31	193.2	386.5	1932.7	3865.5

Posteriormente a partir del biogás teórico producido se calculó el calor contenido en dicho biogás, lo cual se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Energía teórica del biogás (W)

↓ TRH (d) / V(L)→	10	100	140	200	500	1000	5000	10000
40	2.68	26.75	37.45	53.50	133.75	267.5	1337.5	2675.0
60	1.78	17.83	24.97	35.67	89.17	178.3	891.6	1783.3
80	1.34	13.38	18.73	26.75	66.88	133.7	668.7	1337.5
100	1.07	10.70	14.98	21.40	53.50	107.0	535.0	1070.0
120	0.89	8.92	12.48	17.83	44.58	89.1	445.8	891.6

Como siguiente paso se aplicó la Ecuación 2 de Zupančič & Ros (2003), para calcular la energía requerida en watts para elevar la temperatura del influente a la temperatura de operación, los resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Requerimientos de energía (W) para elevar la temperatura del influente

↓ TRH (d) / V(L)→	10	100	140	200	500	1000	5000	10000
40	0.09	0.85	1.19	1.70	4.25	8.51	42.53	85.07
60	0.06	0.57	0.79	1.13	2.84	5.67	28.36	56.71
80	0.04	0.43	0.60	0.85	2.13	4.25	21.27	42.53
100	0.03	0.34	0.48	0.68	1.70	3.40	17.01	34.03
120	0.03	0.28	0.40	0.57	1.42	2.84	14.18	28.36

Como segunda parte se realizó la Tabla 8 en donde se muestran los aislantes que se consideraron y sus coeficientes de transferencia de calor (The Engineering ToolBox, 2003), así como los datos necesarios para calcular el coeficiente de transferencia de calor total “y”, en este cálculo el espesor de la fibra de vidrio es variable “x”, ya que se consideró que está relacionada con el diámetro del digestor.

Tabla 8. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor del digestor

Tipo de aislante	Espesor (m)	Coeficiente de transferencia
Inside α_{in}	-	245 W/m^2*K
Pared plástica	0.003	0.16 W/m*K
Fibra de vidrio	"x"	0.04 W/m*K
Polietileno de baja densidad	0.002	0.33 W/m*K
Outside α_{out}, α_{grs}, α_{grw}	-	23.3 W/m^2*K
	k=	"y" W/m^2*K

Considerando que la relación de D/H es de 2.22 (45/100 cm) que es la relación de dimensiones del digestor de 140 L a utilizar, que el aislante es 0.48 veces el diámetro y que la transferencia de calor tiene una eficiencia del 60% se calculó el diámetro, altura, área superficial y coeficiente de transferencia para cada uno de los distintos volúmenes a considerar en el análisis y se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Dimensiones y coeficientes de transferencia de calor de digestores a distintas escalas

Volumen (L)	Volumen (m^3)	H (m)	D (m)	AS (m^2)	k (W/m^2*K)
10	0.01	0.40	0.18	0.27	0.4506
100	0.1	0.86	0.39	1.27	0.2129
140	0.14	0.96	0.43	1.59	0.1906
200	0.2	1.08	0.49	2.02	0.1695
500	0.5	1.46	0.66	3.72	0.1253
1000	1	1.85	0.83	5.90	0.0996
5000	5	3.16	1.42	17.25	0.0584
10000	10	3.98	1.79	27.38	0.0464

H=Altura del digestor anaerobio, D=diámetro del digestor anaerobio, AS=área superficial del digestor anaerobio, k=coeficiente global de transferencia de calor

A partir del cálculo del área superficial, los coeficientes de transferencia de calor, una temperatura ambiente de 18 °C y una temperatura de operación de 25 °C se calcularon las pérdidas de calor a través de las paredes del digestor con la Ecuación 1 de Zupančič & Ros (2003), los cuales se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Pérdidas de calor a través de las paredes del digestor hacia el ambiente

Volumen (L)	10	100	140	200	500	1000	5000	10000
Pérdidas (W)	1.44	3.16	3.54	3.99	5.43	6.86	11.76	14.83

A partir de los datos obtenidos anteriormente se realizó un balance global de energía, con el objetivo de conocer la energía faltante o sobrante considerando la energía generada con el biogás producido y restando los requerimientos de energía y se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 11, a partir de esto podemos decir que energéticamente hablando conviene trabajar con volúmenes más grandes para así poder obtener ganancias de energía

Tabla 11. Energía total disponible (Q_T = ETB – Q_S - Q_C)

↓ TRH (d)/ V (L) →	10	100	140	200	500	1000	5000	10000
40	1.15	22.74	32.72	47.81	124.07	252.14	1283.2	2575.1
60	0.29	14.11	20.64	30.54	80.90	165.81	851.6	1711.8
80	-0.14	9.79	14.59	21.91	59.32	122.64	635.7	1280.1
100	-0.40	7.20	10.97	16.73	46.37	96.74	506.2	1021.2
120	-0.58	5.48	8.55	13.28	37.73	79.48	419.9	848.5

Como se puede observar a partir de un digestor de 100 L se tienen ganancias de energía cuando el tamaño del digestor aumenta y el TRH disminuye, esto debido a que el flujo de influente es mayor y por ende se espera que la producción de biogás sea mayor. Además, el aislante aumenta respectivamente como aumenta el tamaño del digestor lo que ayuda a que las pérdidas de calor no sean tan grandes como el requerimiento de energía para calentar el influente a la temperatura de operación, como mencionan Zupančič & Ros (2003), que las pérdidas de calor a través de las paredes representan del 2 al 8% de la energía requerida para calentar el influente.

Por otra parte, El-Mashad et al. (2003), también hacen énfasis de la importancia de la elección de un buen aislante y de cómo el volumen influye en los requerimientos de energía, teniendo más energía total disponible en aquellos digestores de mayor volumen ya que entre mayor sea el volumen, la relación “área superficial: volumen” disminuye es decir las pérdidas de calor a través de las paredes impactan menos en reactores de mayor volumen y mejor aislante.

De manera gráfica la energía total en los distintos tamaños de digestor y TRH se muestran en la **Figura 5**, podemos observar que entre mayor sea el volumen del digestor y menor el TRH mayores son las ganancias en términos de balances energéticos. Ya

aplicado al digestor anaerobio se deben de considerar otros factores como que el TRH no puede ser tan bajo cuando se empieza a trabajar con temperaturas psicrofílicas.

También se debe realizar un balance costo-beneficio para hacer la elección de un aislante con un coeficiente de transferencia de calor bajo y un costo accesible que permitan que el proceso de digestión anaerobia sea viable. Este tipo de decisiones dependen del uso (investigación, hogar, industria), cantidad y tipos de residuos y presupuesto disponible.

Para este caso de estudio, teóricamente se tiene una ganancia energética de 20.64 watts, es decir que, en el biogás producido es suficiente para cubrir los requerimientos energéticos para operar el digestor anaerobio a 25 °C.

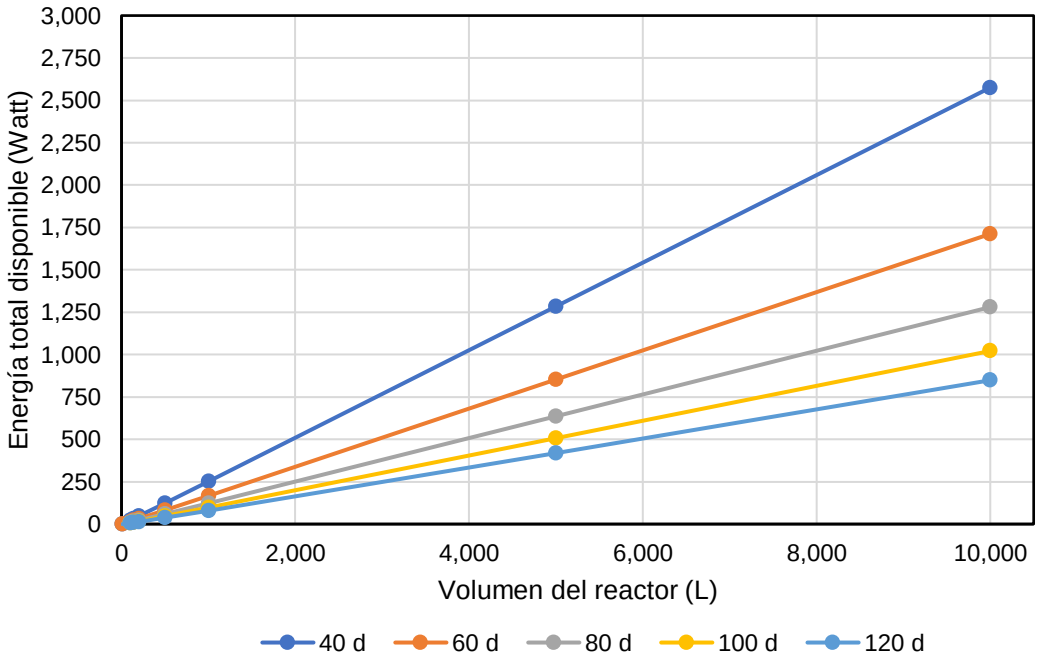


Figura 5. Balance global de energía

Analizando ambos requerimientos de energía podemos observar que conforme aumenta el tamaño del digestor y disminuye el TRH, aumenta el calor requerido para calentar el influente respecto al calor perdido a través de las paredes del digestor (Tabla 12), es decir, en los digestores en donde tenemos la mayor ganancia de energía, la mayoría de los requerimientos de calor corresponden al calor utilizado en el influente.

Tabla 12. Porcentaje de energía para calentar el influente (Qs) respecto a las pérdidas de energía a través de las paredes del digestor (Q_c)

↓ TRH/V →	10	100	140	200	500	1000	5000	10000
40	6%	27%	34%	43%	78%	124%	362%	574%
60	4%	18%	22%	28%	52%	83%	241%	382%
80	3%	13%	17%	21%	39%	62%	181%	287%
100	2%	11%	13%	17%	31%	50%	145%	229%
120	2%	9%	11%	14%	26%	41%	121%	191%

7.2 Rendimientos del digestor anaerobio de 160 L del Laboratorio de Modelos hidráulicos

Dentro de la operación del digestor anaerobio del Laboratorio de Modelos Hidráulicos se monitorearon distintos parámetros como producción de biogás, el porcentaje de metano, eficiencia de remoción de sólidos volátiles, pH y temperatura de operación. En las siguientes secciones se muestran los datos obtenidos.

7.2.1 Producción de biogás y % de metano

En lo que respecta a la producción de biogás en la **Figura 6** se muestra la producción diaria de biogás, se observó un comportamiento similar entre semana y semana, teniendo las producciones más bajas los lunes y aumentando esta producción diariamente hasta los jueves para aumentar drásticamente los viernes debido a la doble alimentación.

En promedio se generaron 93.49 ± 16.34 L/d de biogás con un porcentaje de metano promedio de 60%.

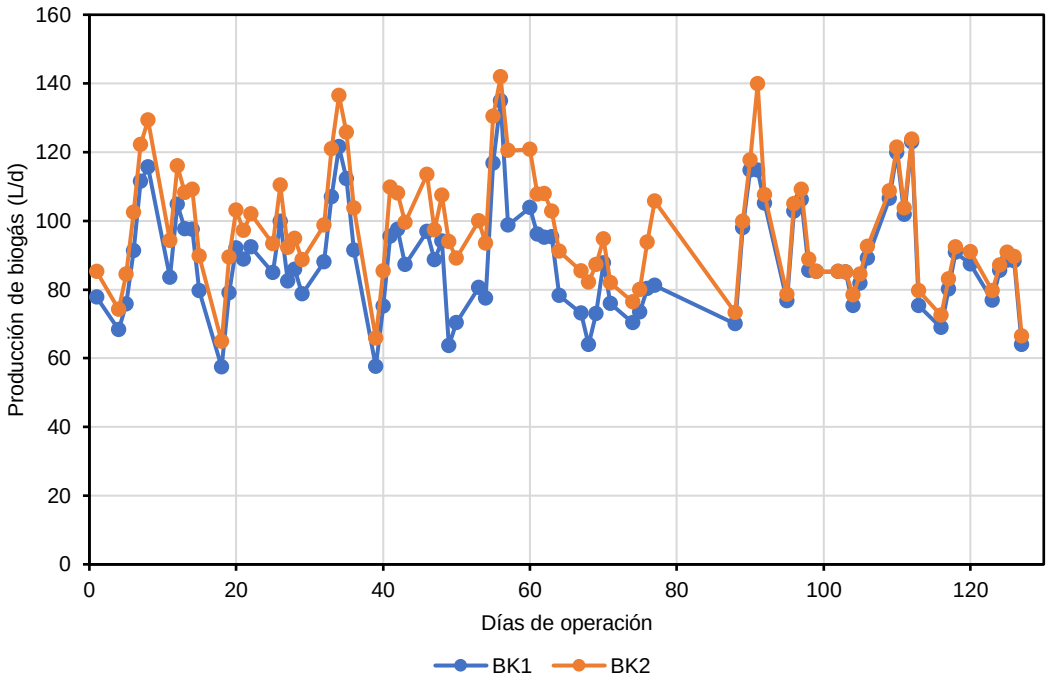


Figura 6. Producción de biogás en el digestor de 160 L. BK1= medidor de biogás 1, BK2= medidor de biogás 2

7.2.2 Eficiencia de remoción de sólidos volátiles

Debido a que el sustrato de codigestión se preparó con ROC variados, mantener la misma concentración de sólidos volátiles en todas las alimentaciones es complicado, en la **Figura 7** se muestra las concentraciones de SV en el sustrato de codigestión (SV_{apli}) y en el efluente (SV_{rem}) para el digestor de 160 L.

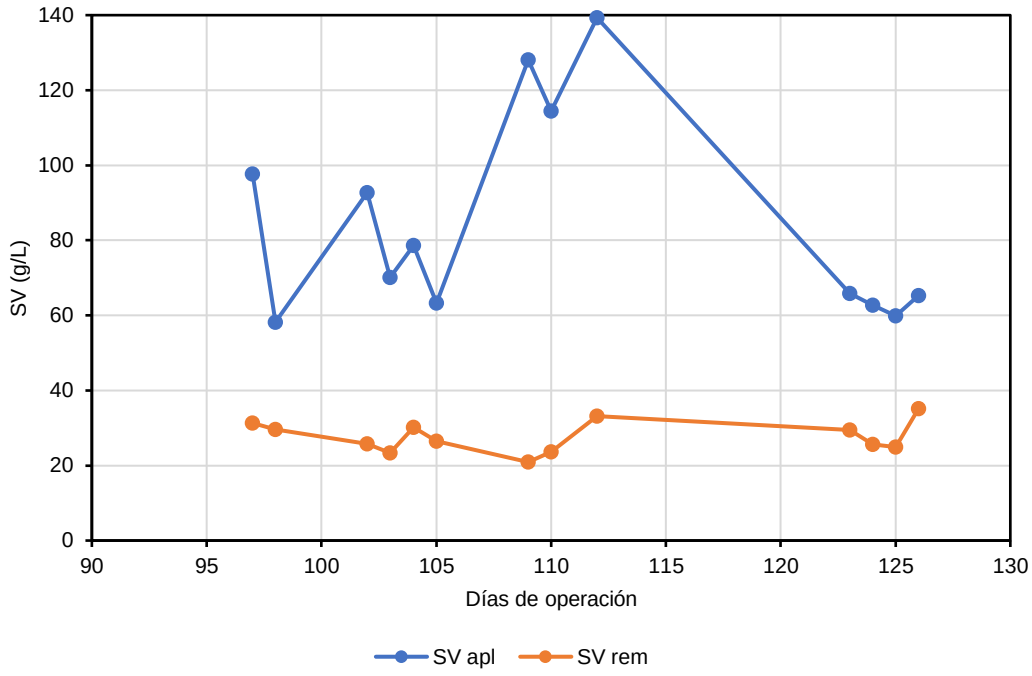


Figura 7. SV_{apli} y SV_{rem} en el digestor de 160 L

En la **Figura 7** se observa que, aunque los SV_{apli} son variados en cada una de las alimentaciones, el efluente tiende a salir en concentraciones entre 20 y 35 g/L de SV. Esta tendencia es un indicativo de que el contenido del digestor alcanzó una concentración estable y que puede soportar variaciones altas de SV en el influente (hasta 140 g-SV/L) por ciertos periodos de tiempo.

En promedio se obtuvo una remoción de SV de 64 ± 0.11 %, como se puede observar la **Figura 7,** la mayoría de las alimentaciones estuvieron dentro de una concentración de 60 a 80 g/L de SV, pero también se observa que entre mayor sean los SV_{apli}, mayor es el porcentaje de remoción de sólidos, por tanto, se puede aumentar los SV_{apli} para aumentar la remoción de estos.

7.2.3 pH

En el digestor anaerobio de 160L también, se monitoreo el pH y la temperatura de operación como se muestra en la **Figura 8** se puede observar que el pH del efluente se encuentra en valores de entre 6 y 8, con un promedio de 7.25 ± 0.54 que de acuerdo con bibliografía son valores óptimos de operación (Parra et al., 2019).

Se puede observar que los pH del influente tienden a ser ácidos con un promedio de 4.49 ± 0.68 y que independientemente de esto el digestor anaerobio tiene una capacidad buffer que permite mantener la operación en pH que tienden al neutro. El digestor anaerobio tiende a actuar como amortiguador de pH cuando está estable (Rusín et al., 2021).

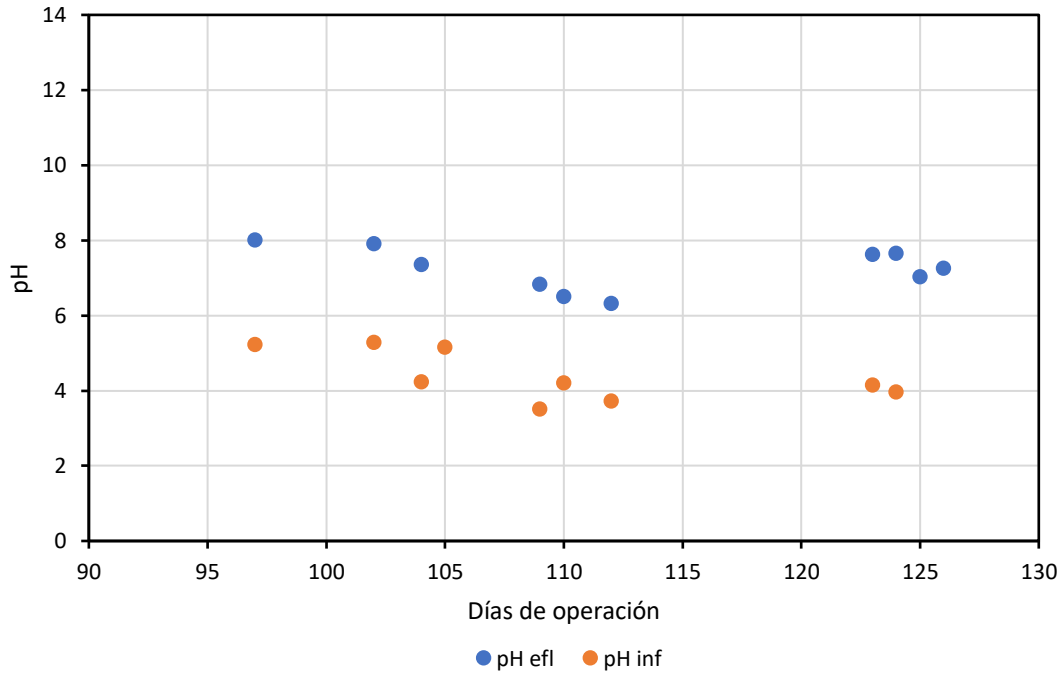


Figura 8. pH del digestor de 160 L

7.2.4 Temperatura de operación del digestor anaerobio de 160 L

Como se mencionó en la metodología el digestor anaerobio se operó en el Laboratorio de Modelos Hidráulicos, en la **Figura 9** se muestran las temperaturas ambientales de dicho laboratorio. Se observó que la temperatura ambiental varía de entre 15 a 22 °C a lo largo del día, es decir, se tiene un gradiente de temperatura de 7 °C, esto es de

esperarse debido a que es un lugar grande, techado con láminas y sin ningún tipo de aislamiento.

La temperatura ambiental afectó directamente al digestor anaerobio de 160 L, debido a que este no se encontraba aislado y, por tanto, está expuesto directamente a estos cambios de temperatura. En estos 4 meses de experimentación la temperatura del digestor anaerobio se encontró entre 17 y 18 °C, es decir, se estuvo trabajando en temperaturas psicrofílicas, y aun así se tuvo un buen funcionamiento. Se recomienda aislar el digestor anaerobio si se opera en el LMH debido a que las fluctuaciones de temperatura son mayores y la temperatura durante la madrugada tiende a disminuir hasta 5 °C en los meses de invierno.

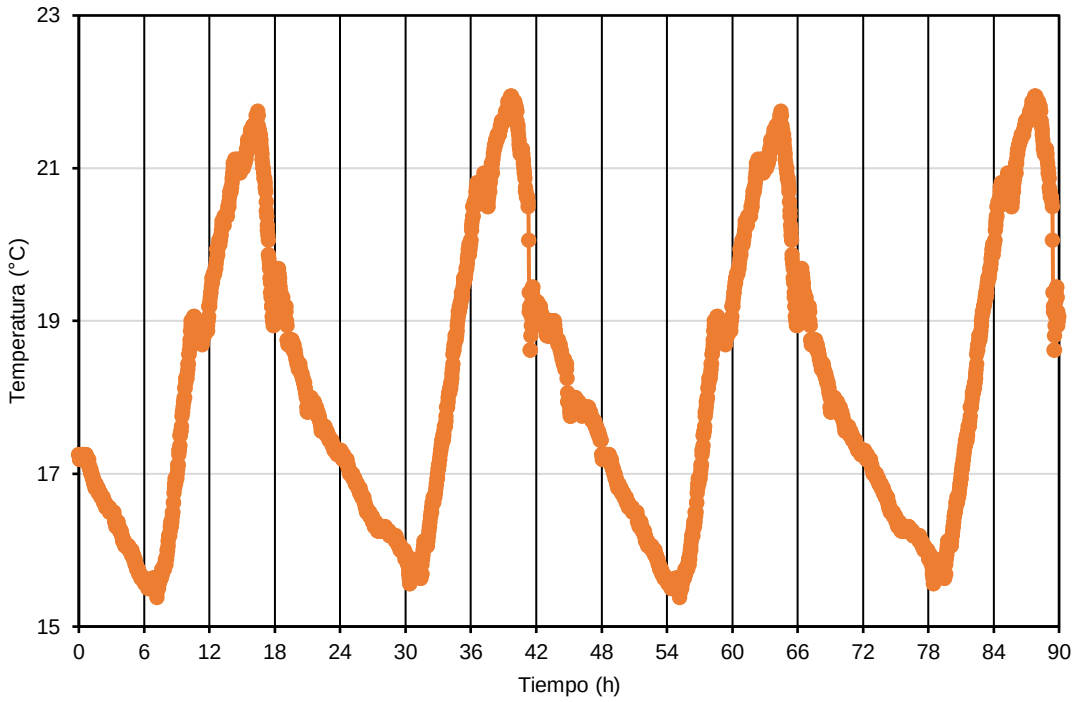


Figura 9. Temperatura ambiental del Laboratorio de Modelos Hidráulicos

7.3 Pruebas preliminares de calentamiento

7.3.1 Calentamiento en una hielera de 50 L utilizando un serpentín de cobre de 5 m

La primera fase de pruebas de calentamiento se realizó en una hielera de 50 L. En la **Figura 10** se muestra que el calentamiento no se presenta en forma lineal, al agregar la

línea de tendencia en forma lineal en Excel se tienen pendientes altas de calentamiento (0.53 °C/h, R^2 = 0.94) debido al volumen relativamente pequeño de agua, estas pendientes generan incrementos de temperatura grandes. El primer enfriamiento que muestra la **Figura 10** que se presenta en forma lineal y con una pendiente de enfriamiento (-0.27 °C/h, R^2 = 0.99) la cual es aproximadamente del 50% respecto al calentamiento. Esto se debió a que se estaba operando con la recirculación de agua las 24 horas, lo que provocó que la mini bomba de diafragma se calentará y disminuyera el flujo de agua gradualmente hasta tener únicamente goteo, es decir, un flujo nulo y por ello hubo decaimiento en la temperatura del agua de la hielera. A pesar de esto se aumentó la temperatura desde 16 °C a 26 °C en un lapso de 20 h, y un enfriamiento de 2 °C en un aproximado de 6 h.

En la **Figura 10**, en el segundo incremento de temperatura en la hora 33 se cambió la configuración y se colocó un temporizador, con el objetivo de evitar el calentamiento de la bomba. Se trabajó en 20 ciclos de 40 min con la bomba apagada y 20 min con la bomba encendida que iniciaban a las 15:00 h y terminaban a las 11:00 h. También se colocó con el objetivo de tener tiempo para la acumulación de energía en el agua y tiempo para la transferencia de esta energía (recirculación). Por ello, la temperatura muestra un comportamiento distinto, disminuyendo la linealidad tanto en el calentamiento como en el enfriamiento, en donde se ve claramente cada ciclo como se muestra en la **Figura 11.**

El uso del temporizador generó pendientes similares en el calentamiento y enfriamiento esto nos indica que de mantener este comportamiento el calor ganado muy fácilmente se pierde, lo cual no es conveniente si se quiere aumentar la temperatura interna del digestor anaerobio. En este caso el enfriamiento se debió a que el biogás acumulado disminuyó y no se tuvo la suficiente presión para mantener la flama del mechero Bunsen encendida, esto generó que la transferencia de calor se diera de forma inversa, es decir, se empezaba a enfriar el digestor anaerobio. Podemos observar que el incremento de temperatura cuando se hace uso del temporizador es menor a cuando el flujo es continuo, ya que en un lapso de 13 h (de la hora 39 a la 52) solo se incrementó la temperatura 3 °C.

En la **Figura 12** se muestra un comportamiento de la temperatura en el fin de semana con la configuración a 20 ciclos por día. Se observa que cuando se calentó continuamente de las 15 h a las 36 h, la temperatura aumento de 20 a 27 °C en este periodo de tiempo (0.33 °C/h, R_2 = 0.96), a partir de las 40 h hasta las 80 h se enfrió (-.16 °C/h, R_2 = 0.92) debido a que en el fin de semana no se podía mantener encendido el sistema de calentamiento.

La **Figura 12**, muestra un comportamiento que no es lo deseable, debido a que tan rápido como se caliente el sistema así de rápido este tendrá la tendencia a enfriarse. En este punto, el sistema de calentamiento con la hielera no se muestra viable debido a que, aunque es posible aumentar la temperatura de forma rápida este aumento de temperatura no se mantiene. En un fin de semana se enfrió lo que se calentó en 5 días.

De comportarse de esta forma la temperatura de operación del digestor anaerobio las bacterias estarían expuestas a fluctuaciones significativas de temperatura que afectarían la estabilidad, y también nos muestra que a pesar de que las hieleras están diseñadas para aislar la temperatura interna, no son tan eficientes como se pensaría.

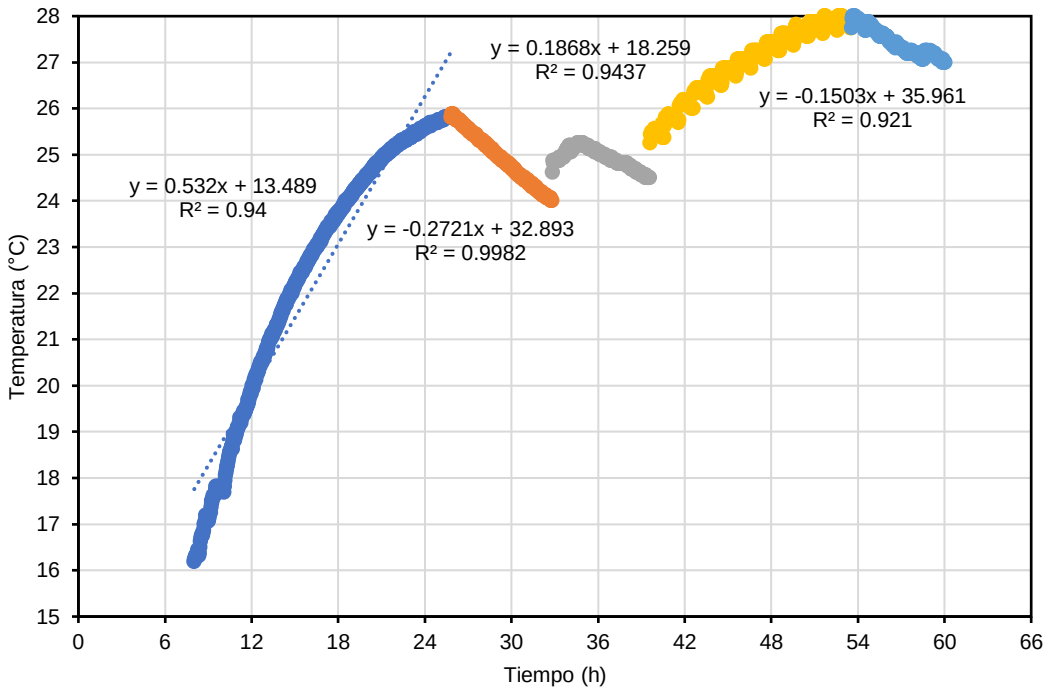


Figura 10. Calentamiento en hielera de 50 L, 20 ciclos de calentamiento 40:20 (OFF: ON)

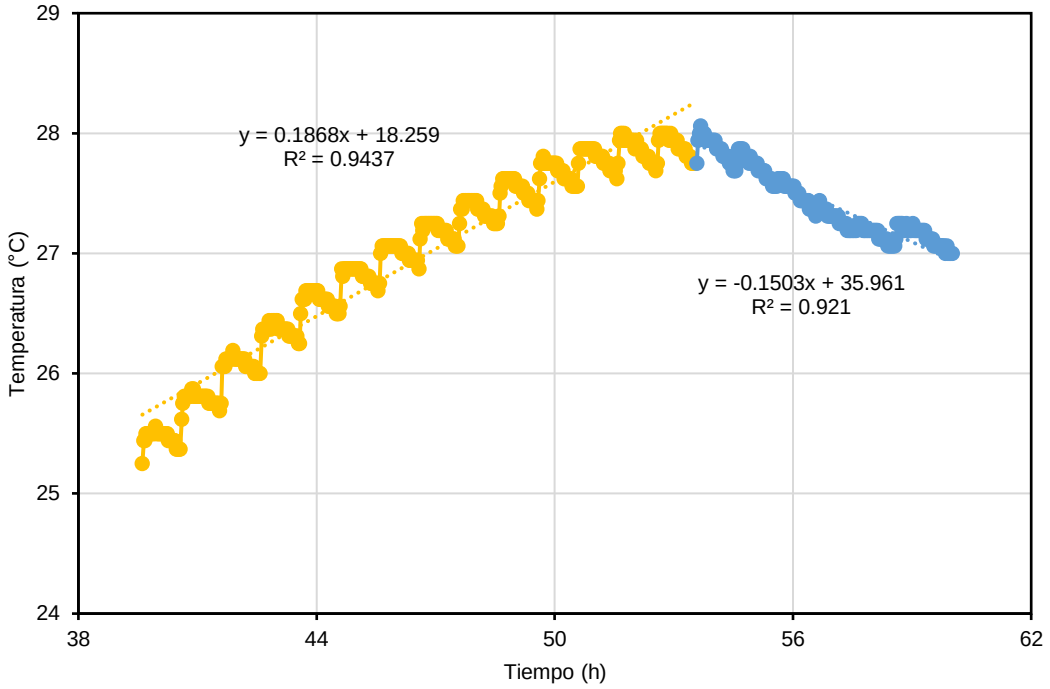


Figura 11. Calentamiento en hielera de 50 L, 20 ciclos de calentamiento 40:20 (OFF: ON) (Con temporizador)

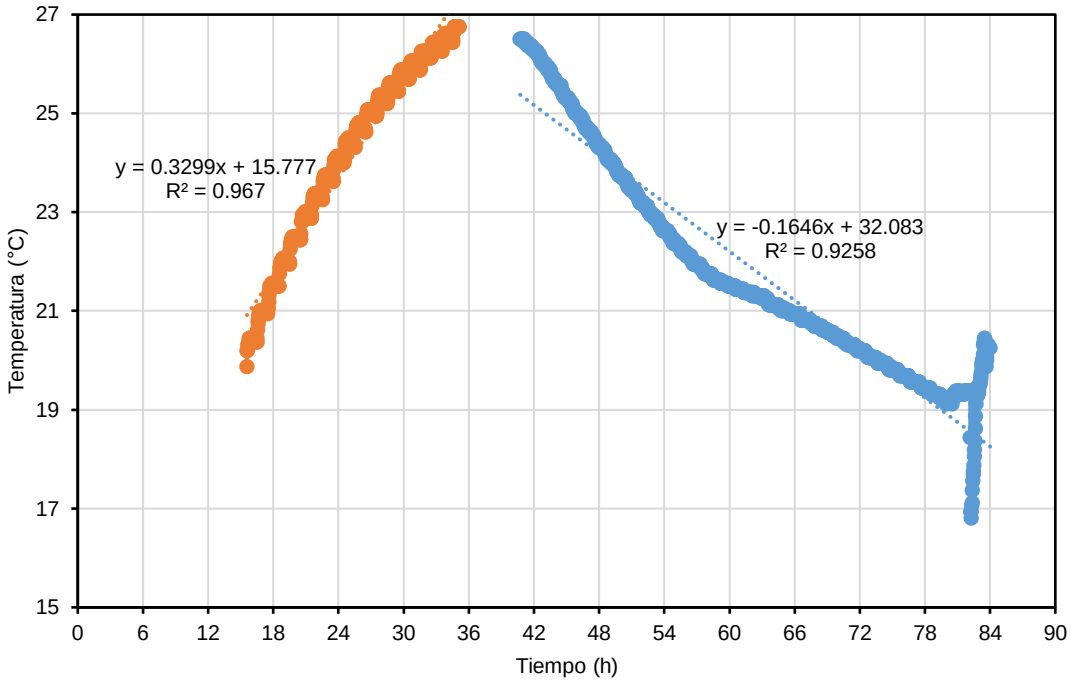


Figura 12. Calentamiento en hielera de 50 L, 20 ciclos de calentamiento 40:20 (OFF: ON) (Fin de semana)

7.3.2 Calentamiento en un contenedor de 140 L con un serpentín de cobre de 5 m y sin aislante

Como segunda fase de pruebas de calentamiento se decidió trabajar con el volumen de agua igual al digestor a operar (140 L) para obtener resultados más reales respecto al volumen del reactor y se mantuvieron los 20 ciclos al día de 40:20 (OFF/ON) .En la **Figura 13** y **15** se puede observar un comportamiento singular en el cual se visualiza un incremento de temperatura y posteriormente tener un comportamiento similar en el enfriamiento, estos incrementos se deben al encendido de la recirculación de agua. En la **Figura 14** se muestra de cerca el comportamiento de temperatura donde se observa que al encenderse la recirculación de agua se genera el aumento/disminución de temperatura de manera notable y después al apagarse la recirculación alcanza el equilibrio térmico y permanece constante la temperatura hasta el nuevo ciclo (se visualiza la forma de un escalón en cada hora).

La temperatura aumenta durante el tiempo de calentamiento y se enfría durante el tiempo de enfriamiento, por ejemplo, en el primer día se calentó de 16.5 a 18.5 °C durante el tiempo de calentamiento de 12 a 20 h, y se enfrió de 18.5 a 16.5°C. Sin embargo, de un día a otro, siempre hay una ganancia de 0.5 °C aproximadamente. Al final del calentamiento de 4 días (lunes-jueves), la temperatura se incrementó de 16.5 a 18.5 °C.

Respecto a las pendientes de calentamiento y enfriamiento, se observa que las pendientes de calentamiento son similares a las pendientes de enfriamiento, es decir, que el calor no se conserva, esto se debe a que el digestor anaerobio no estaba aislado y además se disminuye la temperatura notablemente si el agua se recircula sin tener el calentamiento/flama encendida, lo cual no es el comportamiento deseado con la implementación del sistema de calentamiento, ya que lo deseado es el aumento de temperatura con la acumulación de energía térmica. En general en 5 días se logra aumentar la temperatura del agua de 2 – 2.5 °C.

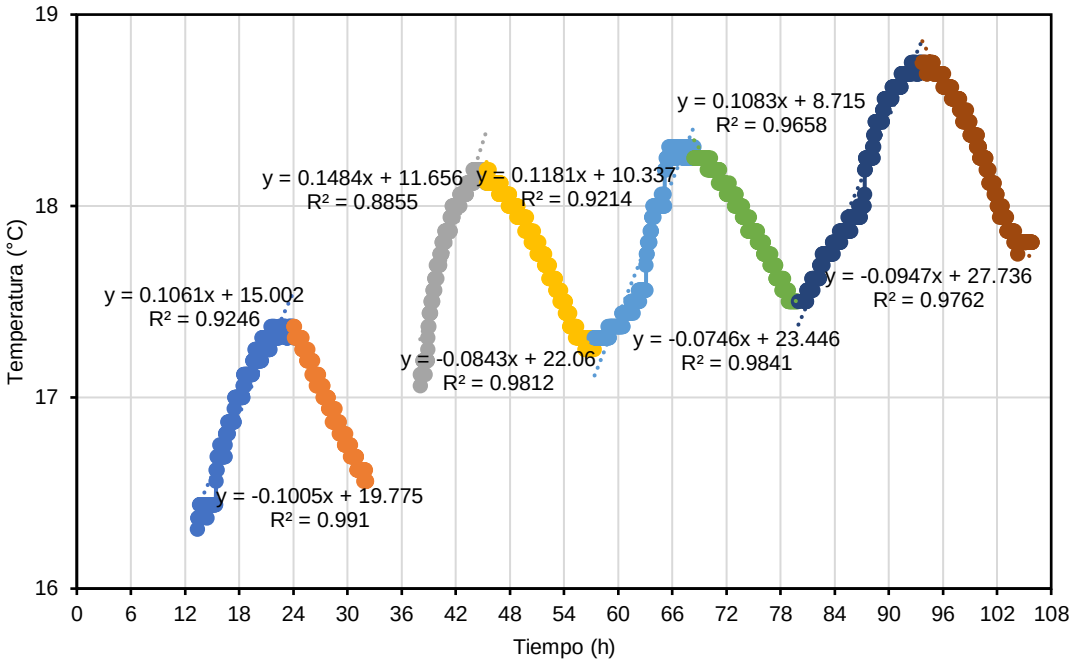


Figura 13. Calentamiento en contenedor de 160 L sin aislante, 20 ciclos 40:20 (OFF: ON)

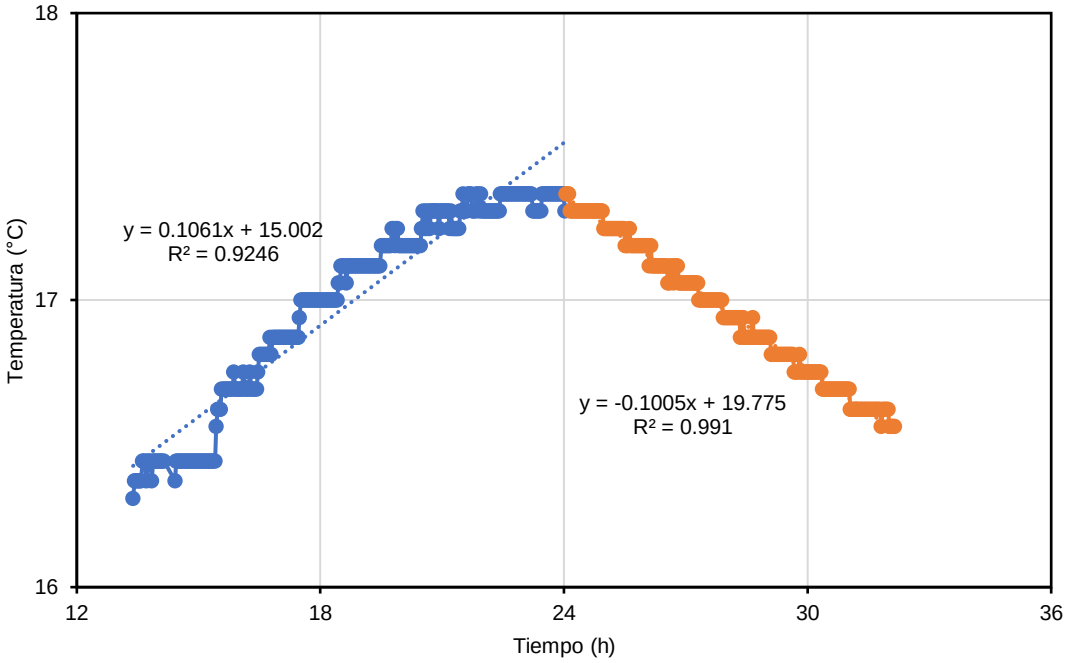


Figura 14. Comportamiento escalonado en el calentamiento en contenedor de 160 L sin aislante, 20 ciclos 40:20 (OFF: ON)

Analizando la **Figura 15**, en donde se muestra el comportamiento en un fin de semana en el cual la flama logró permanecer encendida hasta las 8:00 p.m. del viernes, se puede observar que entre más grande sea la diferencia entre la temperatura ambiental y la temperatura del reactor, la pendiente de enfriamiento es mayor, y que en este caso el día sábado y domingo la temperatura ambiente ayudó a aumentar la temperatura del reactor a medio día, sin embargo, esta ganancia de temperatura no se mantiene y se enfría por la noche, de aquí se concluye que la utilización de aislantes en el digestor anaerobio es necesaria para disminuir las pérdidas de energía y da pauta para la siguiente fase de prueba del sistema de calentamiento.

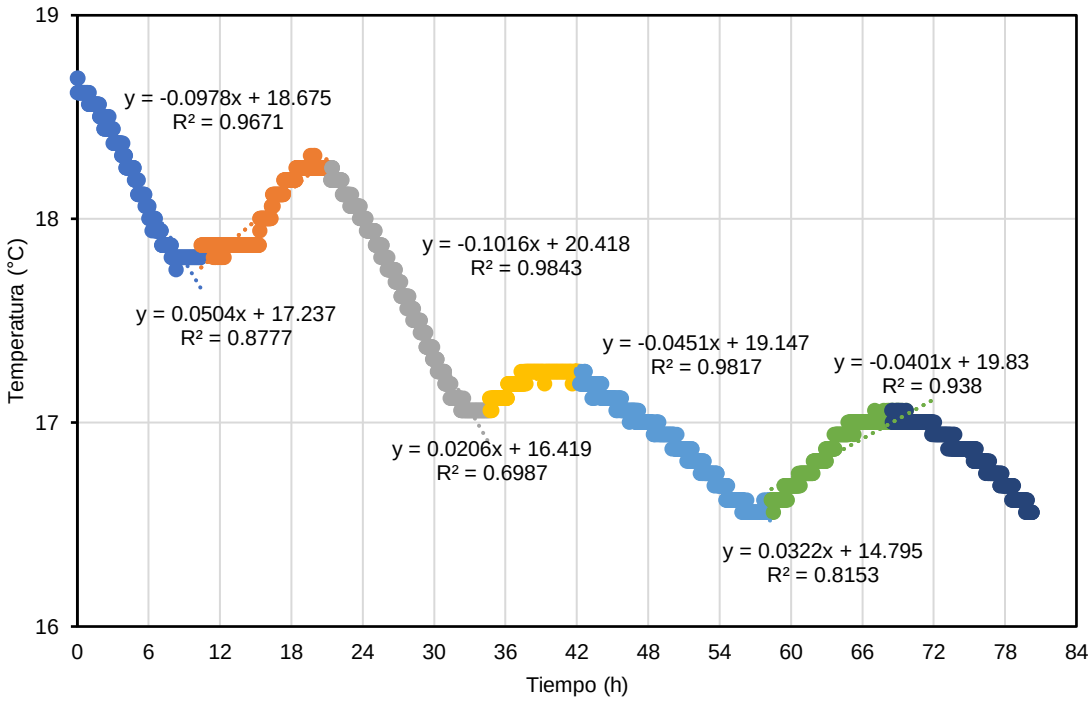


Figura 15. Calentamiento en contenedor de 160 L sin aislante (Fin de semana), 20 ciclos 40:20 (OFF: ON)

7.3.3 Calentamiento en un contenedor de 160 L con un serpentín de cobre de 18 m y con aislante

En la siguiente fase de pruebas de calentamiento se aisló el reactor con 5 cm de fibra de vidrio y una capa de polietileno de baja densidad y se cambió el serpentín de cobre por uno nuevo de 18 m y 3/8” de diámetro, se mantuvo la configuración de 20 ciclos (40: 20, OFF: ON) de 15:00 a 11:00 h.

En la **Figura 16**, se muestra el aumento de temperatura, en el cual logró mantener el calentamiento/flama encendida durante todos los ciclos. Al realizar regresión lineal se puede observar que la pendiente de calentamiento disminuye respecto a las figuras mostradas anteriormente (0.06 °C/h, R_2 = 0.91), esto debido a que el sistema debe vencer las temperaturas bajas que se presentan durante la noche y madrugada, en donde las pérdidas de energía al ambiente son más significativas al tener un gradiente de temperatura mayor.

En la **Figura 16,** el comportamiento de la temperatura cambio significativamente debido a que, aunque la pendiente de calentamiento no aumento significativamente, la pendiente de enfriamiento (-0.01 °C/h, R_2 = 0.77) disminuyo a un 10% respecto a la pendiente de enfriamiento cuando no se tenía el reactor aislado (-0.10 °C/h, R_2 = 0.98), esto nos dice que el aislante fue beneficioso para el sistema ya que el calor ganado no se pierde con la misma velocidad.

De estos resultados se llegó a la conclusión de que el sistema de calentamiento es viable y que es posible incrementar la temperatura del digestor anaerobio de manera gradual, con este tipo de configuración en donde el calentamiento se hace después de las 15:00 h hasta las 11:00 h el calentamiento funciona, pero el control de la flama es difícil si no se tiene un control de flujo de biogás, por ello, en las siguientes fases experimentales se utilizó una configuración distinta con calentamiento durante el día.

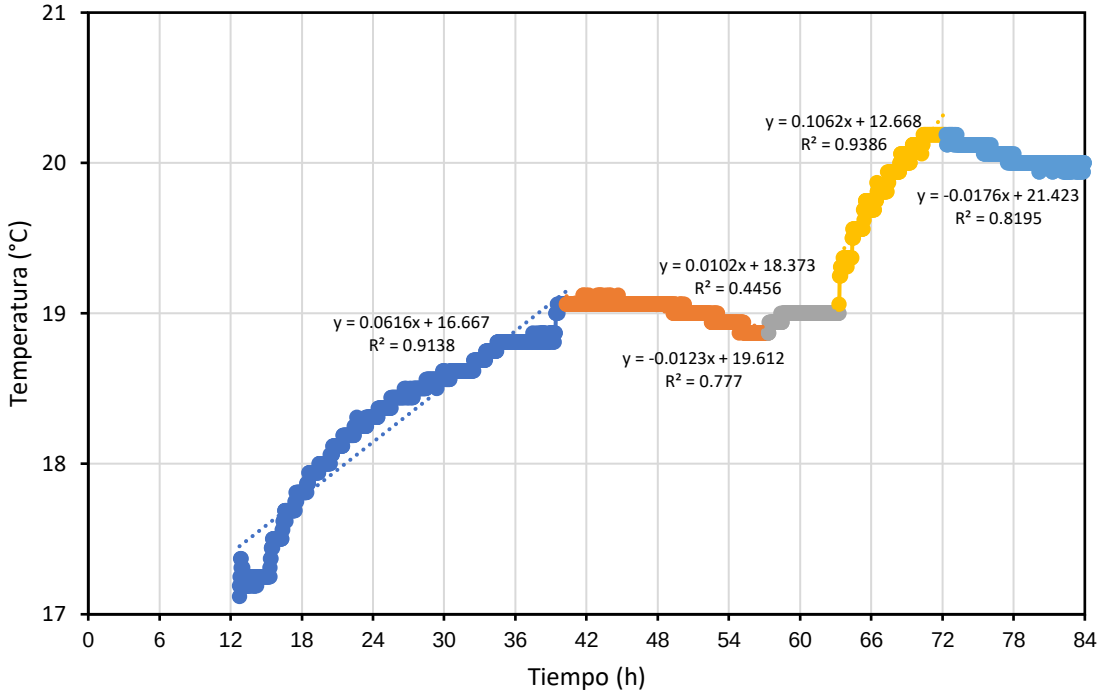


Figura 16. Calentamiento en contenedor de 160 L con aislante, 20 ciclos 40:20 (OFF: ON)

Analizando el calentamiento con esta configuración en un fin de semana (**Figura 17**), se puede observar que, aunque la flama/calentamiento no se logró mantener encendido más allá del viernes en la noche mientras la bomba de recirculación de agua permaneció encendida, las pendientes de enfriamiento son pequeñas, lo que logra que el sistema solo pierda 1 °C en todo el fin de semana, aun cuando se recircula agua sin calentar. En este caso se continua con el problema de no poder controlar la flama encendida, por ello, en la siguiente fase de experimentación se cambió la configuración para tener ciclos de calentamiento durante el día, y el sistema apagado durante la noche, esto con la finalidad de evitar fugas de biogás y poder aprovechar al máximo la energía disponible.

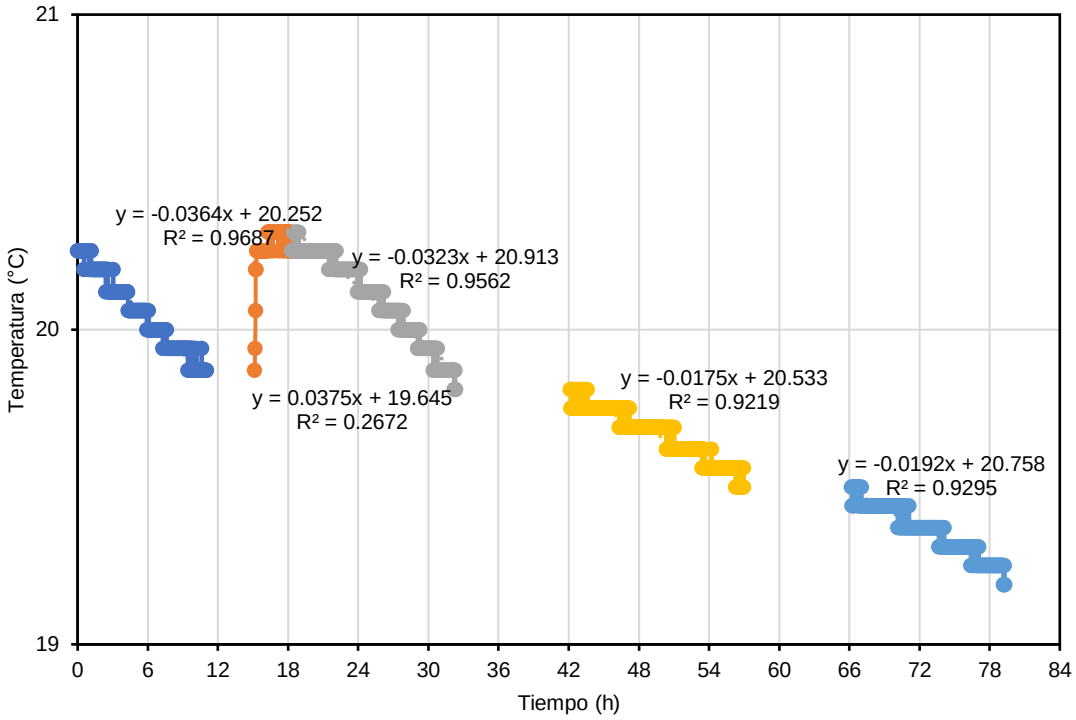


Figura 17. Calentamiento en contenedor de 160 L con aislante (Fin de semana), 20 ciclos 40:20 (OFF: ON)

7.3.4 Calentamiento en un contenedor de 160 L con un serpentín de cobre de 18 m y con aislante (calentamiento de día)

En esta prueba de calentamiento los ciclos de calentamiento se realizaron de 9:00 h a 15:00 h, pudiendo así supervisar que la flama se mantuviera encendida. En la **Figura 18** se puede visualizar que el incremento de temperatura es de 1 a 1.5 °C promedio por día y que la temperatura se pierde aproximadamente en un 50%, teniendo así que después de tres días de calentamiento la temperatura interna del contenedor de 160 L aumenta de 19 a 21.19 °C, lo que se traduce en un aumento de la temperatura gradual y acumulativo dentro del reactor. Esta configuración representó la mejor opción para los ciclos de calentamiento durante el día.

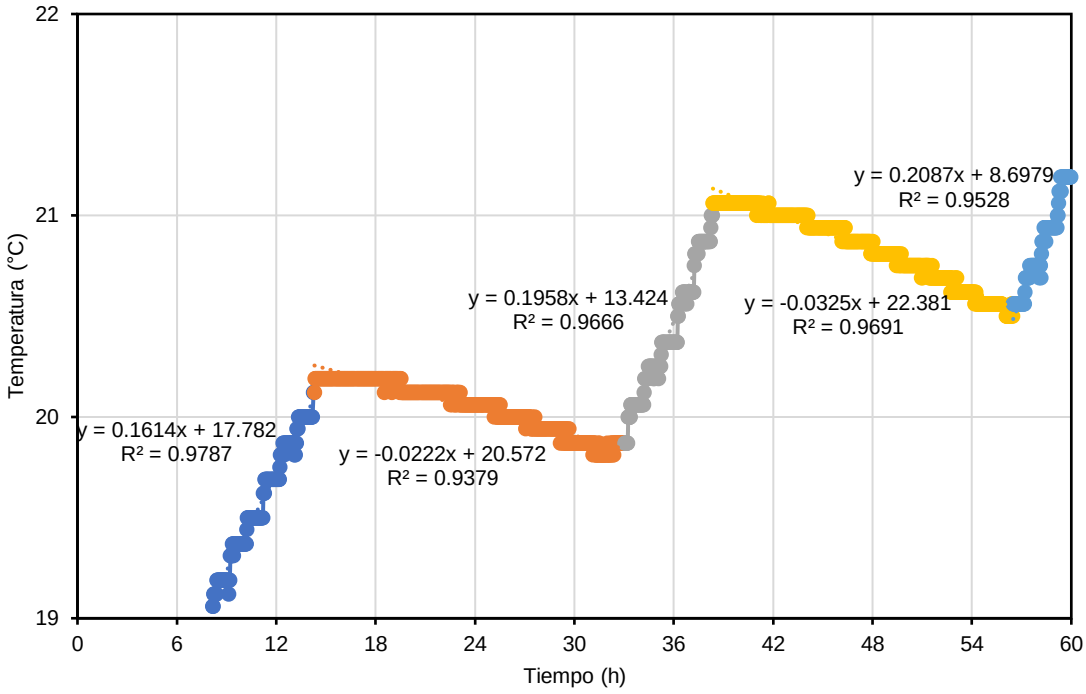


Figura 18. Calentamiento en contenedor de 160 L con aislante, 6 ciclos 40:20 (OFF: ON)

Al llegar el fin de semana (**Figura 19**) se optó por dejar la configuración de 20 ciclos de recirculación de agua, pero podemos observar que la flama no permaneció encendida, por lo cual, aunque la pendiente de calentamiento es baja, se pierde un 60% de la energía acumulada durante tres días de calentamiento de la semana, por ello es necesario cambiar la configuración de calentamiento en fin de semana o en su caso no calentar en fin de semana.

El siguiente paso fue cambiar el digestor al LCA, con el objetivo de tener el digestor en un sitio en donde el gradiente de temperatura es menor, manteniendo el sistema de calentamiento en 6 ciclos y con el aumento gradual de temperatura. Para en un futuro poder aumentar la producción de biogás y con ello aumentar el tiempo de calentamiento hasta tener el calentamiento constante durante las 24 h del día.

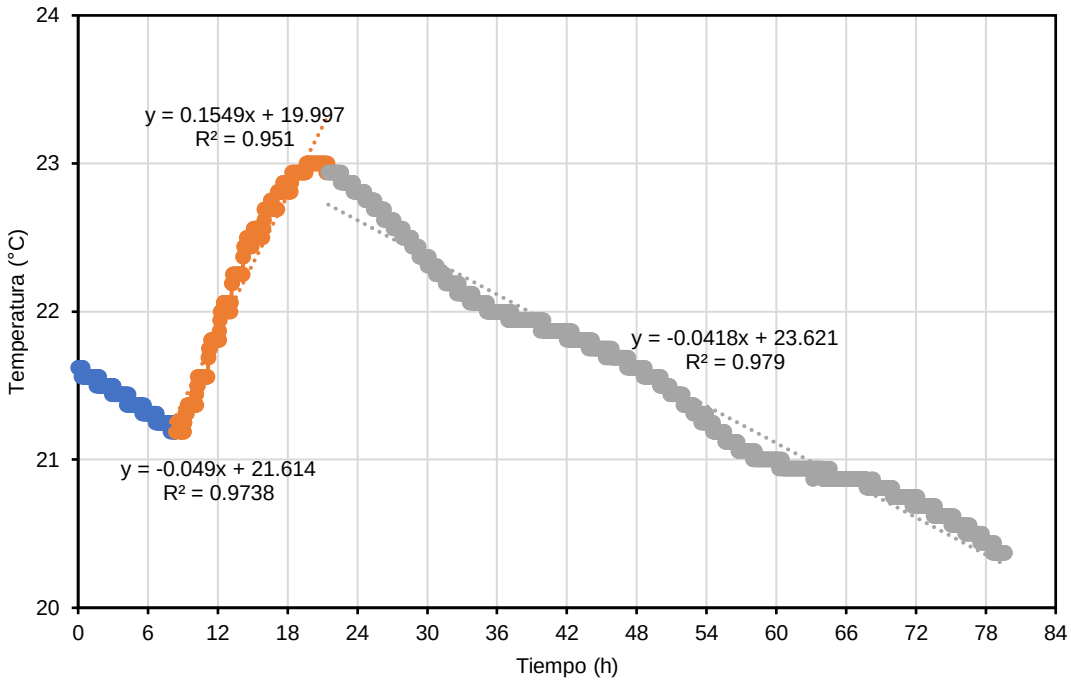


Figura 19. Calentamiento en contenedor de 160 L con aislante, 6 ciclos 40:20 (OFF: ON)

7.4 Calentamiento de un digestor anaerobio de 140 L

En la **Figura 20**, se muestra tanto la temperatura ambiente del LCA como la temperatura de operación del digestor anaerobio. La temperatura ambiente promedio durante los 130 días de operación fue 17.17 ± 2.52 °C, mientras que la temperatura de operación promedio fue de 22.60 ± 3.17 °C. Se puede observar que la temperatura de operación del digestor se mantuvo dentro del rango psicrofílico en las primeras dos corridas experimentales, debido a que se trabajó en época invernal, ya en la tercera corrida existió un aumento de temperatura ambiente ya que se llevó a cabo a final del invierno e inicio de primavera.

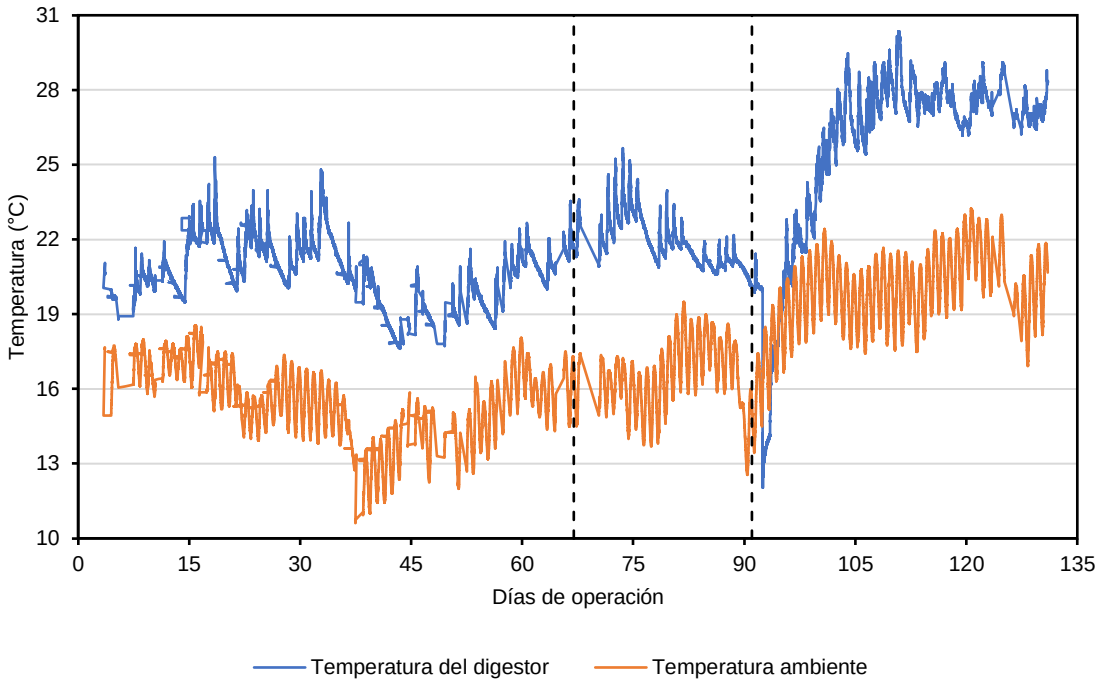


Figura 20. Temperatura ambiente LCA y temperatura de operación de digestor anaerobio de 140 L. Las líneas verticales punteadas separan las tres corridas experimentales.

En la **Figura 21** se muestra el ΔT entre la temperatura ambiente y la temperatura de operación, se puede observar que siempre se mantuvo una diferencia mayor a 2 °C, a excepción del inicio de la tercera corrida experimental (Día 92), debido a que el lodo con el cual se inoculó el digestor tenía baja temperatura porque estaba almacenado en el LMH.

En promedio durante los 130 días de operación el ΔT fue de 5.43 ± 2.18 °C. Cabe resaltar que, durante la primera, segunda y tercera corrida los ΔT fueron similares, siendo en promedio de 5.26 ± 1.50, 5.28 ± 1.76 y 5.75 ± 3.01 °C, respectivamente, esto en general muestra que el sistema de calentamiento funcionó, ya que la temperatura de operación del digestor anaerobio se mantuvo por encima de la temperatura ambiente.

Cabe mencionar que cada una de las configuraciones de calentamiento utilizadas modificó el comportamiento de la temperatura de operación y los rendimientos del digestor, estos detalles se discutirán en las siguientes secciones.

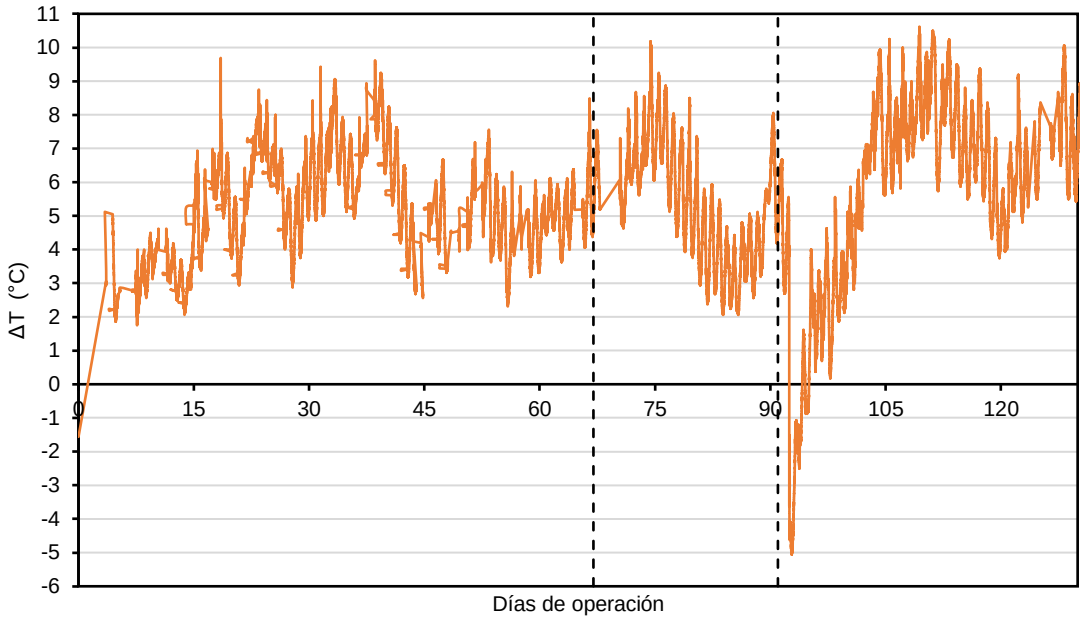


Figura 21. ΔT entre temperatura ambiente LCA y temperatura de operación de digestor anaerobio de 140 L. Las líneas verticales punteadas separan las tres corridas experimentales.

7.4.1 Calentamiento de un digestor anaerobio escala casera de 140 L con 6 ciclos de calentamiento

La primera configuración con la que se experimentó en el digestor anaerobio de 140 L, fue el calentamiento de 9:00 a 15:00 h con 6 ciclos de calentamiento, en donde 40 min se calentaba el agua del matraz y 20 min se realizaba la recirculación de agua en el serpentín de cobre dentro del digestor anaerobio. Cabe resaltar que el digestor anaerobio estaba siendo alimentado y monitoreado durante esta y las siguientes pruebas.

En la **Figura 22** se muestra el comportamiento de la temperatura ambiental y la temperatura de operación durante una semana de la primera corrida. En promedio se aumentaba la temperatura de operación 2 °C durante el calentamiento y se enfriaba 1 °C durante el tiempo en el cual no se calentaba. Por tanto, en una semana se lograba calentar el digestor 5 °C, pero en el fin de semana el digestor se enfriaba 4°C, por lo que en general por semana se aumentó 0.5 °C la temperatura de operación. La temperatura ambiente promedio fue de 15.48 ± 1.54 °C, cabe mencionar la corrida experimental inicio

en época invernal, aun así, la temperatura de operación en promedio fue de 20.75 ± 1.27 °C.

Esta configuración presentó ventajas cómo el poder supervisar al 100% el sistema de calentamiento, esto ayudó a ir regulando el contrapeso sobre la cámara de biogás y que el biogás producido fuera suficiente para quemarlo durante las 6 horas que el calentamiento estaba encendido, además ayudó a mantener la bomba peristáltica trabajando de manera correcta. Sin embargo, se consideró que con esta configuración el aumento de temperatura semanalmente era poco en comparación con el calor suministrado.

También presentó desventajas como el poco aumento de la temperatura de operación de semana a semana y fluctuaciones de temperatura diariamente, debido a que 75% del día el sistema de calentamiento permanecía apagado, si bien, este comportamiento no desestabilizo el digestor anaerobio tampoco se estaba aprovechando la energía invertida.

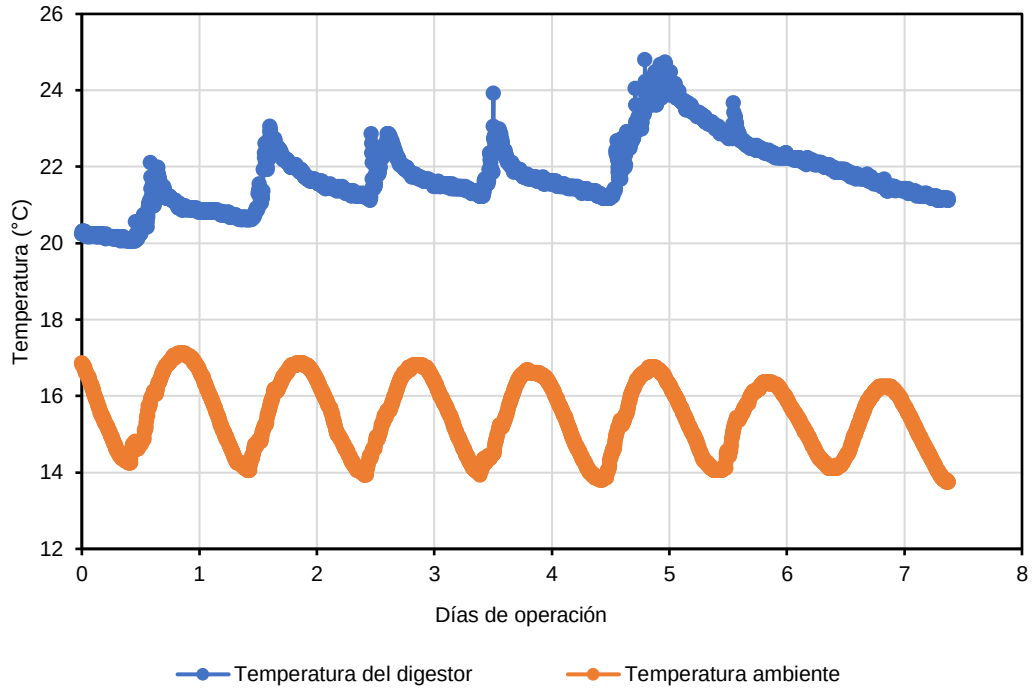


Figura 22. Temperatura ambiente y temperatura de operación durante la primera corrida

7.4.2 Calentamiento de un digestor anaerobio escala casera de 140 L con calentamiento continuo de 6 horas

Partiendo de que con la configuración anterior el aumento de la temperatura de operación era bajo, se optó por conseguir una bomba que pudiese trabajar continuamente. Se mantuvo el horario de calentamiento de 9:00 a 15:00 h. La temperatura ambiente promedio fue de 16.50 ± 1.41 °C y la temperatura de operación de 21.77 ± 1.02 °C.

En la **Figura 23** se muestra el comportamiento de la temperatura de operación durante una semana con la configuración descrita anteriormente. Se tuvo un comportamiento en donde se aumentaba la temperatura de operación de 3 - 4 °C durante el calentamiento y cuando el calentamiento se apagaba la temperatura disminuía abruptamente las primeras horas, al final en una semana se consiguió un aumento de 0.70 °C.

En cuestiones de calentamiento esta configuración aumentó más la temperatura en comparación con la configuración de ciclos, sin embargo, tener cambios tan abruptos de temperatura afecto la actividad metanogénica del digestor anaerobio, ya que provocó la acidificación de este. Tal como menciona El-Mashad et al. (2004b) las fluctuaciones de temperatura afectan la actividad metanogénica y más cuando estas fluctuaciones de temperatura se dan en la disminución de temperatura (hacia abajo), algo similar a lo ocurrido en la presente investigación, ya que con el sistema de calentamiento encendido se alcanzaban temperaturas altas durante 6 horas, pero posteriormente durante las 18 h restantes del día ocurría el enfriamiento, es decir, durante esas 18 h la actividad metanogénica disminuía.

Como se muestra en la **Figura 23** la pendiente de calentamiento durante las primeras horas es pronunciada. Un comportamiento parecido se mostró en el estudio de Wu et al. (2006), donde al tener disminuciones bruscas de temperatura cesó la producción de biogás, principalmente lo atribuyen a que con dicha disminución de temperatura los AGV se acumulan y por ende provocan la caída de pH. En la sección 7.5 se hablará de como esta configuración afecta en general los rendimientos del digestor anaerobio.

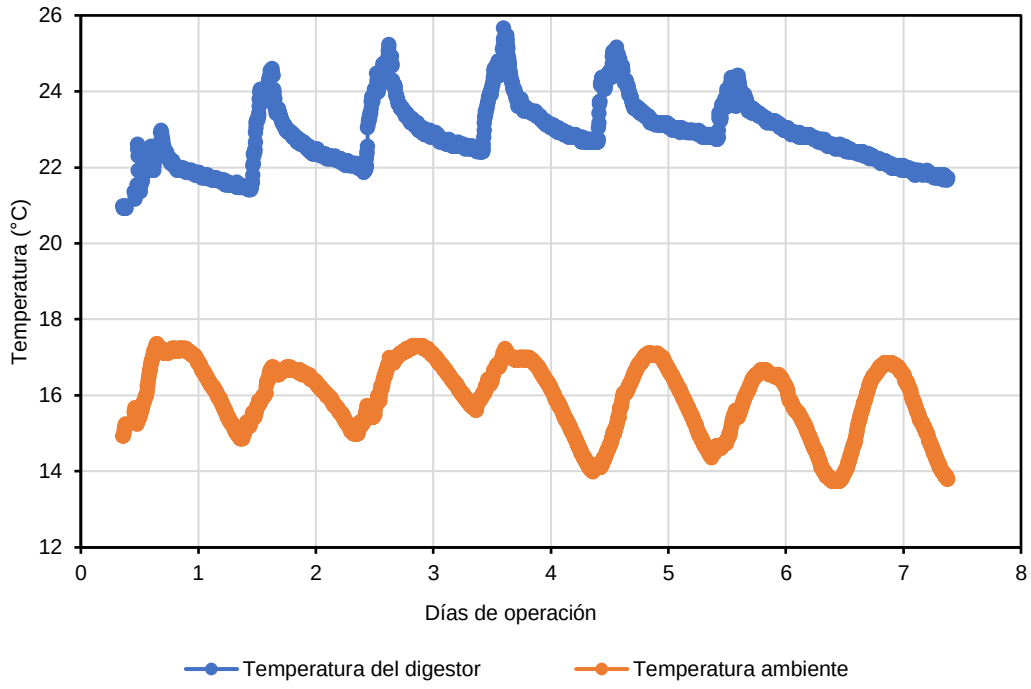


Figura 23. Temperatura ambiente y temperatura de operación durante la segunda corrida

7.4.3 Calentamiento de un digestor anaerobio escala casera de 140 L con calentamiento continuo 24 h al día

Debido a que el digestor anaerobio se acidificó con la configuración anterior de calentamiento, se tuvo que vaciar el digestor anaerobio y volver a inocular con el efluente que se tenía reservado de digestores anaerobios del equipo de trabajo. Se cambió la configuración de calentamiento, teniendo recirculación de agua caliente las 24 h del día 6 días a la semana. La temperatura ambiental promedio fue de 19.94 ± 1.61 °C y la temperatura de operación de 25.69 ± 3.52 °C.

En la **Figura 24** se muestra el comportamiento de la temperatura ambiental y de operación durante una semana de la tercera corrida experimental. Se puede observar que el comportamiento de temperatura no es tan lineal en comparación con las primeras dos corridas, pero el enfriamiento es menos abrupto, lo que es ideal para evitar las fluctuaciones grandes de temperatura, además de que en una semana se logró aumentar la temperatura 3.75 °C y se logró mantener encendido el sistema de calentamiento todo

el día. Esta configuración permitió mantener el digestor anaerobio estable y mejorar los rendimientos en comparación con las dos corridas experimentales anteriores.

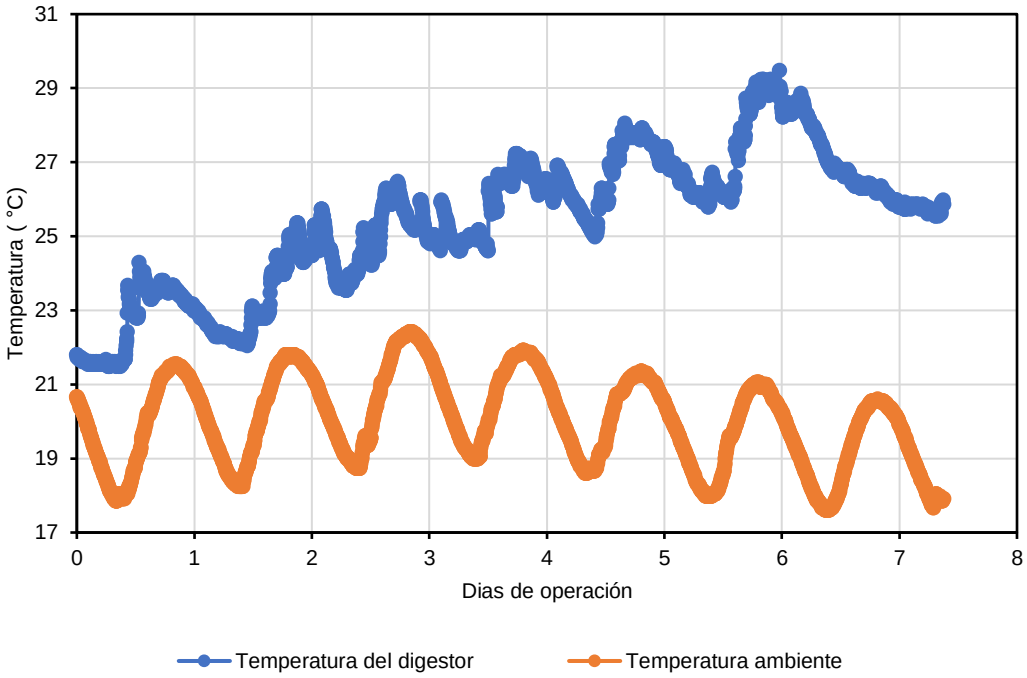


Figura 24. Temperatura ambiente y temperatura de operación durante la tercera corrida

7.5 Rendimientos del digestor anaerobio de 140 L del Laboratorio de calidad del agua

El sistema de calentamiento se aplicó a un digestor anaerobio de 140 L, el cual fue inoculado con lodo del digestor anaerobio de 160 L del LMH en el IITCA. El digestor de 140 L se ubicó en el LCA y se monitoreo producción de biogás, porcentaje de CH_4, producción de CH_4, sólidos volátiles, pH. Los resultados se muestran en las siguientes secciones.

La operación del digestor anaerobio se dividió en tres corridas experimentales, las cuales se definieron a partir de la configuración de calentamiento que se utilizó.

7.5.1 Producción de biogás, % de metano y pH

En promedio a condiciones estándar durante toda la corrida experimental se produjeron diariamente 53.30 ± 17.91 $L_{Biogás}$/d. Durante las tres corridas experimentales los promedios de producción de biogás fueron 55.96 ± 10.81, 41.43 ± 15.84 y 58.21 ± 24.38 $L_{biogás}$/d, respectivamente.

El porcentaje de metano en promedio fue de 62.86 ± 5.95 %, y en cada una de las corridas experimentales de 61.01 ± 1.63, 55.99 ± 2.75 y 71.63 ± 3.25 %, teniendo la mayor producción de biogás en la tercera corrida experimental. Los promedios de porcentaje de metano son favorables en comparación con otros autores como es el caso de Guilford et al. (2019) que obtuvieron un 52.4% de CH_4, operando a temperaturas mesofílicas y tratando ROC y fibras lignocelulosas.

Existen procesos de digestión anaerobia que se llevan a cabo en dos etapas esto con el propósito de tener un mejor control de pH para la mejora de la DA. Tal es el caso de Kinnunen et al. (2015) que operaron este tipo de configuración a temperaturas mesofílicas obteniendo un biogás con 61% de CH_4, resultado similar al obtenido en esta investigación a temperaturas psicrofílicas. Rusín et al. (2021) también investigaron la DA en dos etapas, pero en condiciones psicrofílicas, obteniendo un porcentaje de CH_4 de 55.6%, ligeramente bajo al obtenido en esta investigación.

Como se observa en la **Figura 25** el porcentaje de metano disminuyó en la segunda corrida experimental, esto se debió principalmente a la configuración de calentamiento, en este caso, la disminución drástica del porcentaje de CH_4, fue indicativo de la desestabilización del digestor anaerobio.

En lo respecta al pH, en la primera y tercera corrida, no existieron problemas de desestabilización, independientemente de que el pH del influente en promedio fue de 4.87 ± 0.67 y 4.37 ± 1.30, respectivamente, el digestor anaerobio actuó como un buffer y mantuvo el pH en un promedio de 7.75 ± 0.32 y 7.55 ± 0.37. Situaciones similares presentaron Alcaraz-Ibarra (2019), Méndez-Yunda (2020) y Moncivais-Gómez (2023) que, a pesar de tener pH ácidos en el influente, los reactores se mantuvieron estables en respecto al pH.

Rusín et al. (2021) menciona que un digestor anaerobio que trabaja de forma estable tiene esta capacidad amortiguadora independientemente de la acidez del sustrato, ya que la naturaleza de los ROC es tener pH ácido. De acuerdo con Li et al. (2013), los procesos de codigestión generan un efecto sinérgico ya que proporcionan una adecuada relación C: N, lo cual causa la reducción de la proporción de ácidos grasos volátiles y la alcalinidad total y tiene como resultado de la capacidad de amortiguación.

En la segunda corrida experimental fue en donde a pesar de mantener las condiciones de alimentación con un pH en el influente de 5.10 ± 1.36, del pH del sistema se acidificó de un día para otro, aún con la adición de NaOH fue imposible volver a estabilizar el pH del digestor, teniendo en promedio un pH en el efluente de 7.14 ± 0.79.

Wu et al. (2006) mencionan la acidificación del digestor anaerobio por la acumulación de AGV, además que por la naturaleza de los ROC de acuerdo con Li et al. (2013), se tienen mayores riesgos de acidificación del digestor anaerobio por la producción de AGV. Por otra parte, al estar dentro del rango de temperaturas psicrofílicas es importante monitorear todos los cambios al inicio o al cambiar la configuración de operación del digestor anaerobio, ya que son muy susceptibles al fallo de acuerdo con Rusín et al. (2021). Hay que resaltar que también en la segunda corrida experimental las fluctuaciones de temperatura hacia arriba son altas y autores como El-Mashad et al. (2004b) mencionaron que este tipo de fluctuaciones aumentan la concentración de amoníaco y por ende el pH del digestor anaerobio, aunque en esta investigación el pH disminuyó durante la segunda corrida experimental, sería importante realizar análisis de amoníaco y AGV en futuras investigaciones, para entender mejor el comportamiento del digestor anaerobio.

No se puede afirmar que haya existido acumulación de AGV o amoníaco dentro del DAEC, pero sí que el proceso de acidificación fue rápido (en un día) y fue ocasionado por la configuración de calentamiento, que es el único parámetro que se cambió respecto a la primera y tercera corrida.

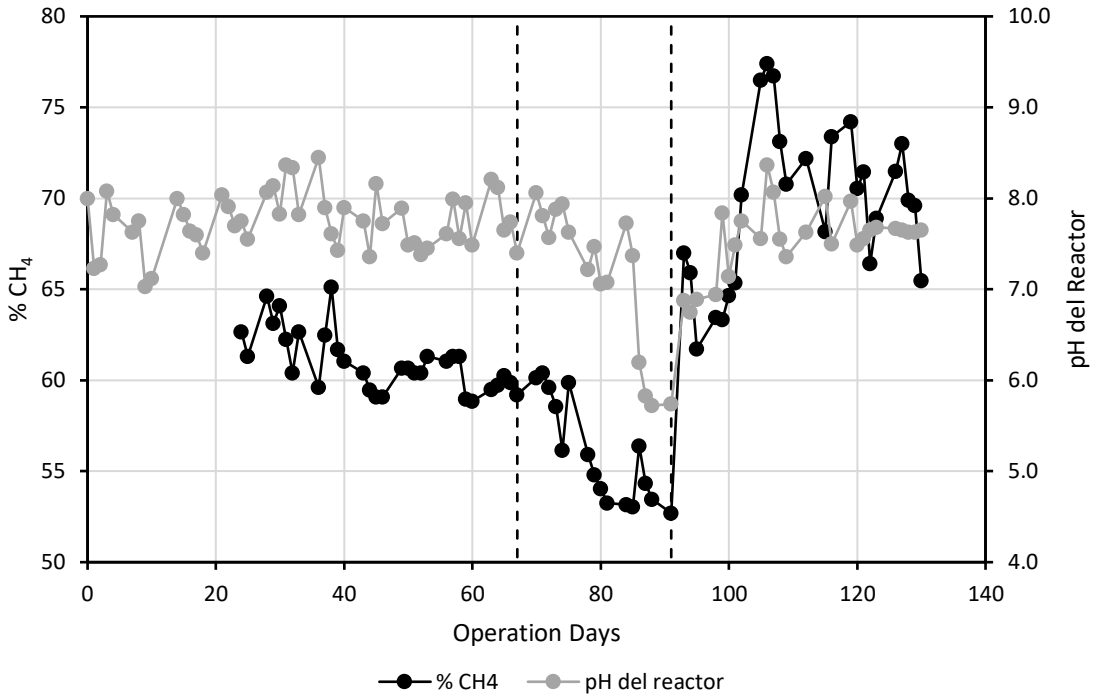


Figura 25. pH y porcentaje de metano en el digestor anaerobio de 140 L.
Las líneas verticales punteadas separan las tres corridas experimentales.

7.5.2 Eficiencia de remoción de sólidos volátiles.

Para la elaboración del sustrato, se utilizaron residuos variables que integrantes del equipo de trabajo proporcionaron, es por ello, que la concentración de sólidos en el influente es variable, tal y como se muestra en la **Figura 26.** En promedio la concentración de SV durante toda la experimentación en el influente fue de 62.94 ± 13.69 g-SV/L, de las tres corridas experimentales fue de 54.97 ± 12.75, 66.78 ± 10.36 y 75.44 ± 7.42 g-SV/L, respectivamente, esto a pesar de que la receta y el modo de preparación no cambió, esto se debe a que al utilizar residuos reales la composición de los residuos es variable (variabilidad de frutas y verduras, grado de maduración, contenido de agua, nutrientes) y por ende es complicado generar sustratos con la misma concentración de SV.

En lo que respecta a las concentraciones del efluente, se observó que la concentración del efluente es similar a la concentración del inóculo utilizado, es decir, durante la primera y segunda corrida experimental, se utilizó un inóculo de una concentración de 18 g-SV/L

y las concentraciones de los efluentes de la primera y segunda corrida tuvieron un promedio de 14.75 ± 0.88 y 16.24 ± 0.57 g-SV/L, respectivamente.

Mientras que en la tercera corrida se inoculó con un lodo de 20 g-SV/L y se obtuvieron concentraciones en el efluente de 19.14 ± 2.42 g-SV/L. Se podría decir que el digestor anaerobio funciona como un tanque completamente mezclado que se opera en modo semicontinuo, tal como menciona Alcaraz-Ibarra (2019), sin embargo, para esta investigación aplicó tanto para TRH cortos (60 d) que respecta a la primera y segunda corrida experimental y TRH largos (140 d) que corresponde a la tercera corrida experimental.

Como se muestra en la **Figura 26** las concentraciones en el efluente no tienen tanta variabilidad, esto independientemente de la variabilidad de las concentraciones en el influente, por tanto, este comportamiento abre pauta para buscar hacer sustratos más concentrados en SV y tener mayores porcentajes de remoción de SV. Además, se puede considerar este parámetro como un factor de estabilidad, es decir, mientras el efluente no aumente de manera significativa su concentración de SV, se podría decir que el digestor anaerobio está trabajando de forma correcta y estable.

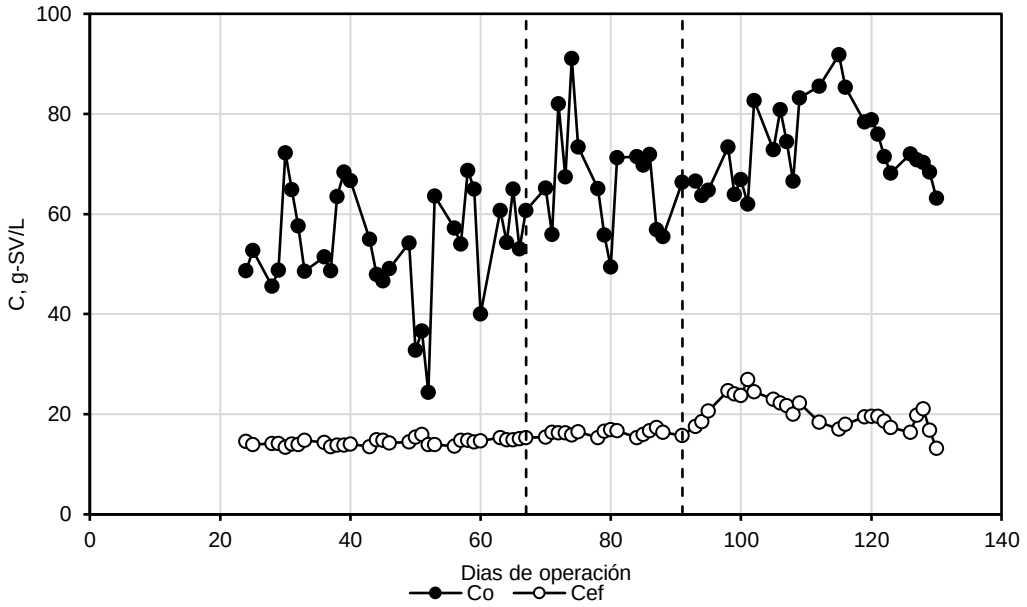


Figura 26. Concentración de SV en el influente y efluente del digestor anaerobio de 140 L.
Las líneas verticales punteadas separan las tres corridas experimentales

Debido a las concentraciones en el influente son variables, los porcentajes de remoción de SV varían respecto a ello (**Figura 27**). En promedio durante toda la experimentación se tuvo una remoción de SV de 72.33 ± 6.87 %, y de 71.46 ± 8.12, 75.04 ± 4.32 y 74.48 ± 3.49 % en cada una de las corridas experimentales.

En el porcentaje de remoción de SV nos encontramos dentro de los valores reportados en distinta bibliografía a temperatura mesofílica y psicrofílica (Tabla 13), Gao et al (2015) a pesar de trabajar a temperaturas mesofílicas obtuvo % de remoción de SV bajos no mayores al 50% esto debido a que realizó mono digestión de ROC, lo cual se ha comprobado no es lo más viable debido a la cantidad de AGV que se generan y que afectan el rendimiento del reactor.

Por otra parte, Guilford et al. (2019) realizaron codigestión de ROC y fibras lignocelulosas, está últimas difíciles de tratar por digestión anaerobia debido a su composición y obtuvieron un 69.4% de remoción de SV, esto atribuido a la composición de sustrato, si bien, al mezclar las fibras lignocelulosas con ROC existe un efecto sinérgico en la DA, la naturaleza de las fibras sigue teniendo impacto sobre el rendimiento del digestor anaerobio. Autores como Kinnunen et al. (2015) obtuvieron un 96% de remoción de SV, esto atribuido a su operación de digestión anaerobia en dos etapas, este tipo de configuración permitió tener un mejor control del pH y se diseñó pensando en las bacterias y productos a obtener con ello optimizando el aprovechamiento de la materia orgánica contenida en el influente.

En el caso de Li et al. (2013) obtuvieron un 87% de remoción de SV, esto debido a que experimento con distintas proporciones de los ingredientes que componen su influente, generando una mezcla con una relación C: N dentro del rango óptimo para llevar a cabo DA.

Respecto a investigaciones realizadas en el IITCA como lo son Alcaraz-Ibarra (2019) y Méndez-Yunda (2020), obtuvieron porcentajes de remoción de SV similares a los obtenidos en esta investigación, esto debido a que la forma de preparación del influente es similar. Con esto, se puede decir, que el porcentaje de remoción de SV se ve altamente influenciada por el tipo de influente añadido.

De acuerdo con el comportamiento que presentó el DAEC existe la posibilidad de aumentar este porcentaje de remoción de SV con el aumento de COV aplicada, pero para ello se debe de asegurar un proceso estable en donde el aumento de COV no afecte el rendimiento y el pH del digestor anaerobio.

Los porcentajes de remoción de SV obtenidos mayor al 70% muestran que el proceso de DA para el tratamiento de LAP y ROC cumple su función respecto al tratamiento de dichos sustratos, ya que reduce la fracción biodegradable. En general los procesos de codigestión de ROC tienden a tener porcentajes de remoción de SV altos debido que este tipo de residuos contienen una mayor densidad de energía y más sustratos disponibles para los microorganismos, lo cual permite una mejor degradación de la materia orgánica (Li et al., 2013).

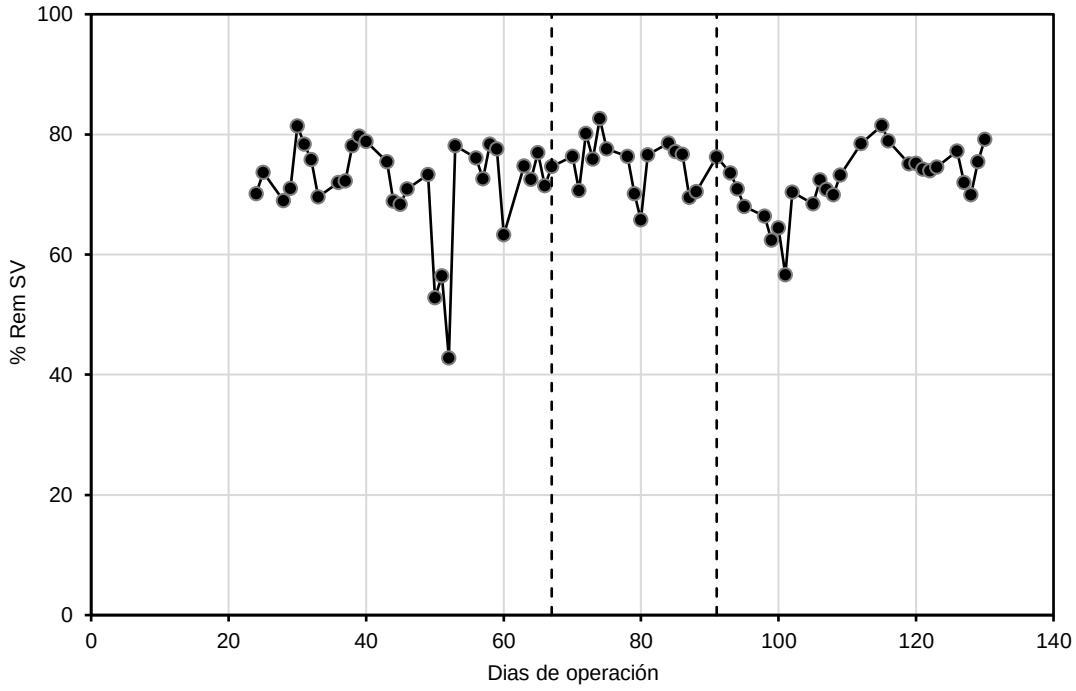


Figura 27. Porcentajes de remoción de SV en el digestor anaerobio de 140 L

Las líneas verticales punteadas separan las tres corridas experimentales

Tabla 13. Tabla comparativa del porcentaje remoción sólidos volátiles

Autor	Tipo de residuos	T_{op}, ºC	TRH, d	% Rem (SV)
Alcaraz-Ibarra (2019)	Receta sintética y lodo biológico de purga	20.24	40-120	59.9 – 74.6
Guilford et al. (2019)	Fibras de papel y cartón con ROC	37- 39	.15	20 – 69.4
Gao et al. (2015)	ROC	41	45	42.8 – 48.4
Kinnunen et al. (2015)	ROC	37.32	72 -318	86- 96
Li et al. (2013)	ROC, rastrojo de maíz y estiércol de pollo	37	20	62 – 87
Méndez - Yunda (2020)	ROC y lodo activado de purga concentrado	20.4	60	58.9 – 74.4
Rusín et al. (2021)	ROC	21 - 40	52- 201	75.6
Tian et al. (2015)	ROC y estiércol de puerco (50%)	35	15 - 62	61 - 85.03
Zhang et al. (2012)	ROC	36	30	-
Este estudio (2024)	ROC y LAP	22.60	60-140	72.33

Los sólidos volátiles representan a la fracción orgánica de una sustancia, es decir, la fracción que puede ser degradada de forma biológica, por tanto, la composición de sólidos volátiles en el sustrato de codigestión son de suma importancia para un buen desempeño de la DA.

En la **Figura 28** se muestra la relación SV/ST en el influente y efluente. El porcentaje de relación de SV respecto a los ST en el influente fue de 84.50 ± 9.16 % durante toda la experimentación, esto indica, que el influente utilizado es en su mayoría de composición orgánica y en cuestiones de degradabilidad el sustrato es apto para someterlo a DA. Al final de la segunda corrida y al inicio de la tercera corrida experimental este porcentaje disminuyó, esto debido a que al lote de influente preparado en esos días se le adicionó

NaOH (compuesto inorgánico), con el propósito de amortiguar el pH cuando se detectó la acidificación del digestor anaerobio.

En el efluente la relación SV/ST fue en promedio de 70.12 ± 3.21%, menor a lo obtenido en el influente, esto como resultado de la degradación de la materia orgánica que se lleva a cabo en el proceso de DA. De acuerdo con Alcaraz-Ibarra (2019) el incremento de la relación de SV/ST en el efluente es un indicativo de la acumulación de materia orgánica dentro del reactor. Durante la primera y segunda corrida experimental este porcentaje se mantuvo estable, es decir, no existió acumulación de materia orgánica dentro del reactor, durante la primera semana de la tercera corrida experimental el SV/ST aumentó ligeramente, esto como un indicativo de presencia de materia orgánica en el lodo con el cual se inoculó el reactor y que fue disminuyendo conforme se fue estabilizando el digestor anaerobio.

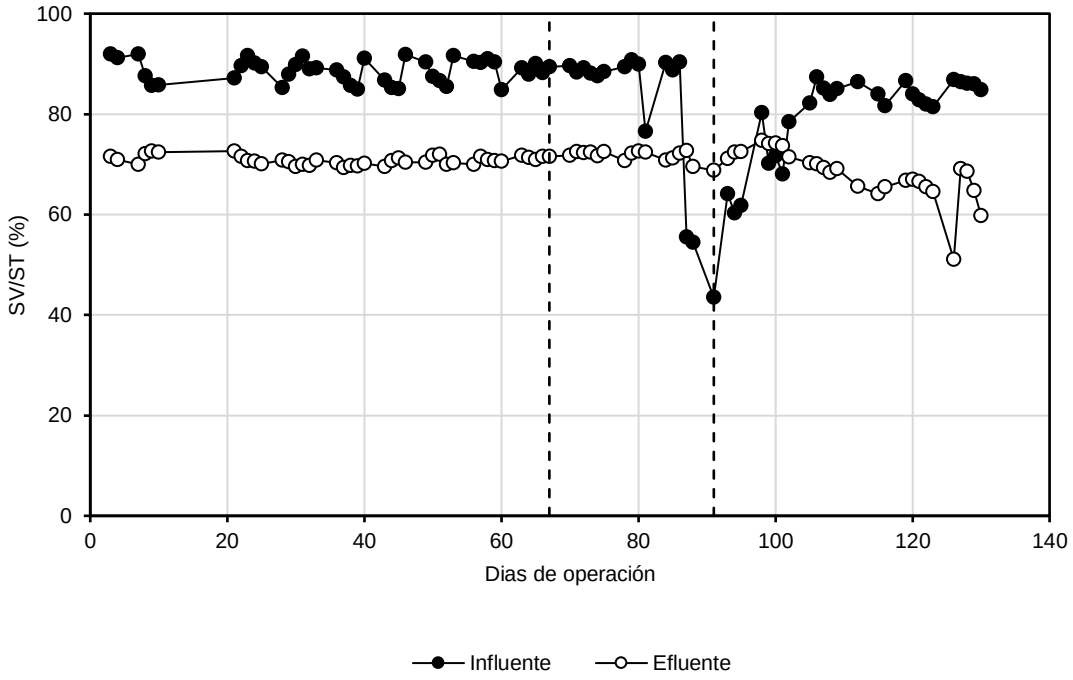


Figura 28. Relación SV/ST en el influente y el efluente

Las líneas verticales punteadas separan las tres corridas experimentales

7.5.3 Producción de metano

La producción de metano varió durante la experimentación de acuerdo con la configuración de calentamiento. En promedio a condiciones estándar durante toda la experimentación se produjeron 34.01 ± 13.62 L_{CH4}/d, en cada una de las corridas el promedio fue de 34.26 ± 7.03, 23.52 ± 9.71 y 42.16 ± 19.22 L_{CH4}/d.

En la primera corrida se trabajó con una COV promedio de 0.90 ± 0.22 g-SV/L/d, en la segunda de 1.10 ± 0.17 g-SV/L/d y la tercera corrida de 0.60 ± 0.12 g-SV/L/d, de aquí cabe destacar que en la tercera corrida a pesar de que fue en donde se aplicó menos COV ya que solo se alimentó un litro de sustrato de codigestión para evitar desestabilizar el digestor anaerobio, fue en donde la producción de CH_4 fue mayor (**Figura 29**), esto se interpreta como que el sistema de calentamiento influyó en el aumento de la producción de metano.

Cabe resaltar que el mayor incremento se observó en la primera semana en la cual, se pasó de 17 a 25 °C, con ello podemos decir, que el aumento de la producción metano se ve reflejada en el lapso de aumento de temperatura, algo similar mencionan Álvarez & Lidén (2008) que estudiaron el comportamiento de un digestor anaerobio cuando medio día aumentaban la temperatura del digestor anaerobio y el otro medio día disminuían la temperatura, ellos observaron que la mayor tasa de producción de metano se presentaba en el lapso de aumento de temperatura y mencionan que inclusive la tasa era mayor a la que se llegaba a presentar en digestores anaerobios que trabajan en temperaturas altas las 24 h del día.

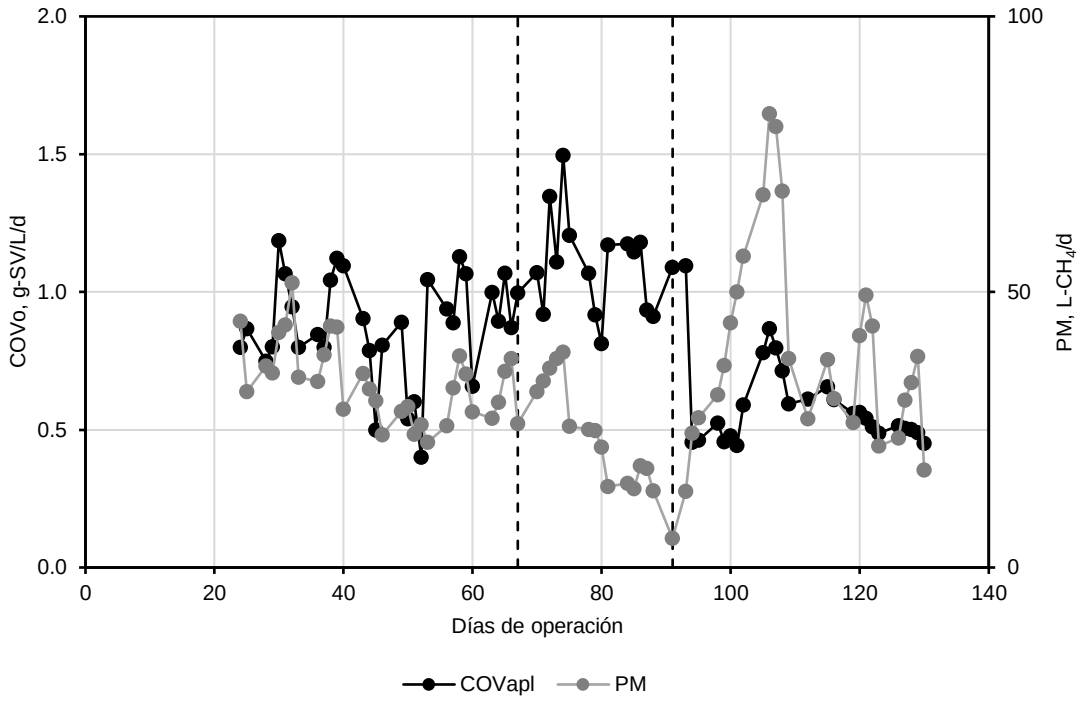


Figura 29. Producción de metano y carga orgánica volumétrica en el digestor anaerobio de 140 L.

Las líneas verticales punteadas separan las tres corridas experimentales.

7.5.4 Rendimiento específico de metano

Durante las tres corridas experimentales se obtuvieron en promedio a condiciones estándar rendimientos específicos de metano de 15.40 ± 3.23, 9.28 ± 5.22 y 37.39 ± 10.85 L_{CH4}/kg-MH_{Agr}. En la tercera corrida se obtuvieron mayores rendimientos debido a la mayor producción de metano con menos caudal de alimentación (1 L/d), COV_{apl} más baja y TRH más largo. A partir de estos datos se puede decir que la configuración de calentamiento es de suma importancia para realmente mejorar el proceso de DA a partir del aumento de temperatura, y más que el aumento de temperatura, lo significativo es el evitar las fluctuaciones en la temperatura de operación.

En la **Figura 30** se muestra el comportamiento del rendimiento específico de metano durante toda la experimentación, se puede observar como en la segunda corrida experimental este comienza a disminuir al punto de ser nulo debido a la acidificación del

DAEC. Mientras en la tercera corrida los valores superan a los rendimientos de las primeras dos corridas experimentales.

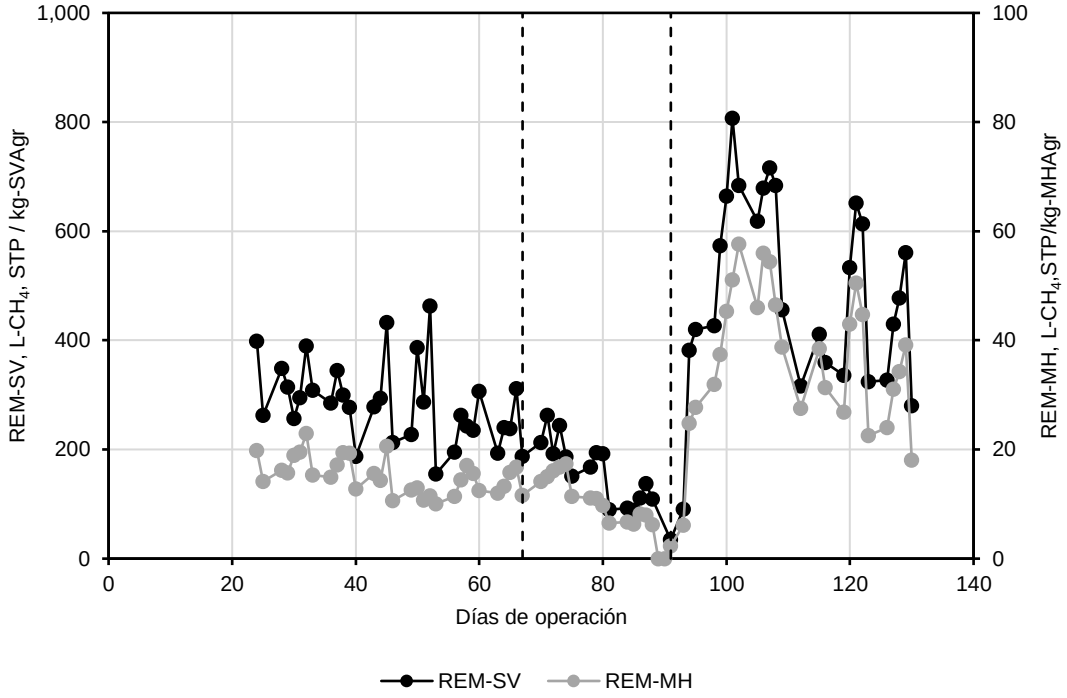


Figura 30. Rendimientos específicos de metano del digestor anaerobio de 140 L

Las líneas verticales punteadas separan las tres corridas experimentales

Otra forma de medir el desempeño del digestor anaerobio es a partir de la producción volumétrica de metano (PVM). Durante toda la corrida experimental en promedio se obtuvo una PVM de 0.24 ± 0.10 L_{CH4}/L_r/d y en cada una de las corridas experimentales promedios de 0.24 ± 0.05, 0.17 ± 0.07 y 0.30 ± 0.14 L_{CH4}/L_r/d. En la **Figura 31**, se puede observar como el comportamiento de la segunda corrida es descendiente, mientras que en la primera corrida el comportamiento es más estable, y en la tercera corrida el comportamiento en la semana de estabilización es muy alto, pero después presenta la tendencia de ir disminuyendo.

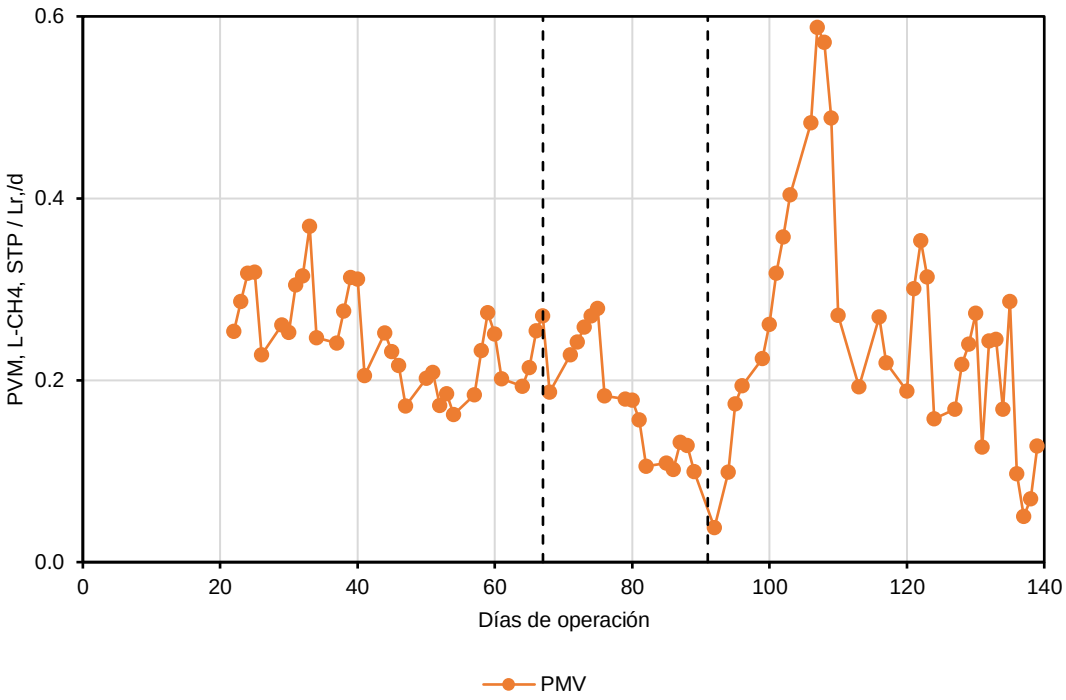


Figura 31. Producción volumétrica de metano del digestor anaerobio de 140 L

Las líneas verticales punteadas separan las tres corridas experimentales

En la **Tabla 14**, se presentan los REM obtenidos por distintos autores. Se puede observar que en su mayoría son digestores anaerobios que trabajan en temperaturas mesofílicas y que esta temperatura la mantienen gracias a sistemas de control de temperatura y sin ningún tipo de aislante.

También se presentan los resultados obtenidos por Alcaraz-Ibarra (2019), Méndez-Yunda (2020) y Moncivais-Gómez (2023), las cuales son investigaciones realizadas en el IITCA. Estas investigaciones se llevaron a cabo en rangos de temperaturas psicrofílicas. Alcaraz-Ibarra (2019) y Méndez-Yunda (2020) no utilizaron ningún tipo de calentamiento o aislamiento es sus digestores anaerobios mientras que Moncivais-Gómez (2023) utilizó un digestor anaerobio aislado con fibra de vidrio, poliestireno expandido y triplay y sin calentamiento.

De manera general, podemos observar que este estudio supera los REM de todas las investigaciones mostradas en la Tabla 14, aún de las llevadas a cabo a temperaturas mesofílicas. Tal es el caso de Guilford et al. (2019) que operaron a temperaturas

mesofílicas gracias al uso de una cinta térmica autorregulable y obtuvieron un rendimiento máximo de 296 $L_{CH4,\ STP}$/kg-SV_{apl} lo que representa un 60.78% del REM máximo obtenido en este estudio, este REM bajo se pudo deber a la naturaleza del sustrato, ya que estaba compuesto por fibras lignocelulosas, las cuales son difíciles de digerir y aunque en codigestión con ROC ayudó en su tratamiento, los REM siguen siendo bajos.

Gao et al. (2015) operaron a temperaturas mesofílicas con ayuda de un equipo comercial que permite el control de temperatura, a pesar de trabajar la mono digestión de ROC obtuvieron un REM máximo de 375 $L_{CH4,\ STP}$/kg-SV_{apl} aproximadamente un 77% lo obtenido en este estudio. Debido a la naturaleza de los ROC se considera que obtuvieron un buen REM debido a el uso de digestores comerciales que permiten el monitoreo automático de distintos parámetros, lo cual, permite la implementación de acciones preventivas y correctivas en tiempo real que pueden ayudar a mejorar la estabilidad del proceso.

Kinnunen et al. (2015) obtuvieron un REM máximo de 466 $L_{CH4,\ STP}$/kg-SV_{apl} trabajando a temperaturas mesofílicas gracias al uso de un sistema de calefacción eléctrico, sin embargo, en este estudio se logró un 4.5 % más en el REM que no es una diferencia significativa. El punto a favor de Kinnunen et al. (2015) es que con su configuración de dos etapas logró mantener la mono digestión de ROC estable, sin embargo, hay que recalcar que un sistema de este tipo implica mayor inversión para la regulación de pH, además del gasto de energía eléctrica para poder mantener el sistema a temperaturas mesofílicas.

Rusín et al. (2021) también trabajaron con DA en dos etapas, la diferencia con Kinnunen et al. (2015) es que cambió la temperatura de operación a condiciones psicrofílicas. Obtuvieron un REM máximo de 444 $L_{CH4,\ STP}$/kg-SV_{apl} un 5% más bajó que Kinnunen et al. (2015), pero que si llevamos esto a un proceso de alta demanda ese 5 % no resulta ser tan significativo en comparación al gasto energético necesario para mantener un proceso a temperaturas mesofílicas.

Li et al. (2013) y Tian et al. (2015) obtuvieron REM de 432 y 409 $L_{CH4,\ STP}$/kg-SV_{apl} respectivamente, ambos operaron a temperaturas mesofílicas lo que probablemente fue factor importante en la obtención de sus REM altos. Ambos trabajaron con codigestión de ROC y estiércol, lo cual mantuvo la relación C: N dentro del rango óptimo (15:25), lo cual ayudó a mantener el pH estable por la presencia de amonio el cual trabajo como buffer. De esta forma se confirma que para la digestión en una sola etapa la mejor opción es la codigestión de ROC y otro sustrato rico en N.

En general este estudio superó los REM obtenidos en la bibliografía antes mencionada (**Figura 32**) con la diferencia que en su mayoría emplearon diferentes formas de calentamiento, lo cual implica un gasto extra en el proceso de DA y en esta investigación se calentó el DAEC con el propio biogás producido, es decir, que se auto satisficieron los requerimientos energéticos. En esta investigación, aún con el uso de un sistema de calentamiento, no se logró llegar a temperaturas mesofílicas, sin embargo, se obtuvieron resultados favorables, por lo que queda aún trabajo a realizar para contestar a la incógnita que surge ¿Qué REM se obtendrían si se logrará alcanzar temperaturas de operación mesofílicas?

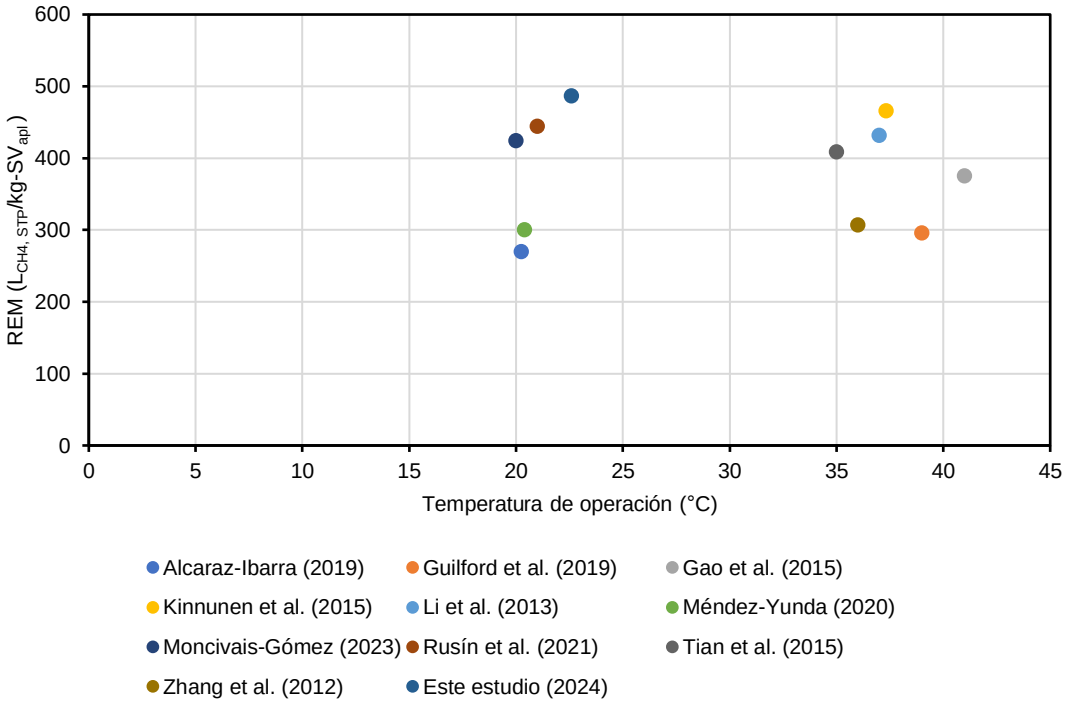


Figura 32. Comparación de REM

Las condiciones de operación que ha establecido el equipo de trabajo durante sus investigaciones son óptimas, porque a pesar de mantenerse en temperaturas psicrofílicas y sin ningún tipo de calentamiento los resultados obtenidos, igualan y superan a los estudios de temperaturas mesofílicas, en este caso, podemos observar que la implementación de un sistema de calentamiento puede mejorar aún más los REM que se pueden obtener.

Tabla 14. Comparación de REM en sistemas con y sin sistema de calentamiento

Autor	T_{op}, ºC	REM, L_{CH4}/kg-SV añadido @STP	Sistema de calentamiento con biogás	Aislante
Alcaraz-Ibarra (2019)	20.24	200-270	NO	NO
Guilford et al. (2019)	37- 39	67- 296	NO	NO
Gao et al. (2015)	41	190 - 375	NO	NO
Kinnunen et al. (2015)	37.32	379 - 466	NO	NO
Li et al. (2013)	37	176 - 432	NO	NO
Méndez-Yunda (2020)	20.4	250 – 300	NO	NO
Moncivais-Gómez (2023)	20	347-424	NO	SI
Rusín et al. (2021)	21 - 40	440 - 444	NO	NO
Tian et al. (2015)	35	248 - 409	NO	NO
Zhang et al. (2012)	36	218 - 307	NO	NO
Este estudio (2024)	22.60	154 - 487	SI	SI

Para verificar si nuestra hipótesis se cumplió o no, se compararon los REM obtenidos en esta investigación con los obtenidos por Alcaraz-Ibarra (2019), Méndez-Yunda (2020) y

Moncivais-Gómez (2023), las cuales fueron investigaciones del equipo del trabajo que llevaron a cabo codigestión anaerobia de ROC y LAP en el LCA

Como se puede observar en este estudio se obtuvo el REM más bajo en la segunda corrida experimental de 154 $L_{CH4,\ STP}$/kg-SV_{apl} y el más alto en la tercera corrida experimental de hasta de 487 $L_{CH4,\ STP}$/kg-SV_{apl}. Tomando en cuenta el valor más alto en este estudio y los estudios a comparar, respecto a Alcaraz-Ibarra (2019) obtuvimos un REM un 80% más alto, respecto a Méndez-Yunda (2020) un 62% más alto y respecto a Moncivais-Gómez (2023) un 15% más alto.

Con los resultados de Moncivais-Gómez (2023) y las pruebas preliminares de calentamiento se puede observar como el simple hecho de aislar el digestor ayuda a mantener la temperatura y mejorar los REM. En el caso de Moncivais-Gómez (2023), además del aislante, lo que probablemente influyo en un REM alto fue el calentamiento del influente, que como se mencionó en el apartado de antecedentes es un requerimiento de energía y de acuerdo con los estudios teóricos para el volumen que Moncivais-Gómez (2023) manejó, este calentamiento representa aproximadamente una tercera parte de los requerimientos de energía total.

Por tanto, podemos decir que nuestra hipótesis se cumplió y que la implementación de un sistema de calentamiento en el digestor anaerobio si mejora en más de un 50% los REM de este. Sin embargo, la configuración del sistema de calentamiento influye en los resultados, ya que lo importante no solo es el aumento de temperatura sino la forma en que se calienta el sistema.

8. CONCLUSIONES

La configuración de calentamiento influye significativamente en el comportamiento y estabilidad del DAEC. Se concluye que no solo se trata de calentar el DAEC, sino que la configuración de calentamiento que se utilice influirá de manera significativa en el rendimiento que este tenga. Por ello es importante seguir estudiando el calentamiento como una oportunidad para mejorar el aprovechamiento de la energía.

De las configuraciones de calentamiento, la más eficiente fue la tercera configuración donde se recirculaba agua caliente las 24 h del día, esto debido a que se propiciaba que las fluctuaciones de temperatura durante el día fueran menos abruptas. Con la tercera configuración se lograron los REM más altos durante la experimentación que en promedio fue de 493 $L_{CH4,\ STP}$/kg-SV_{apl}, respecto a las corridas 1 y 2 representó un 66% y 220% más, respectivamente.

En comparación con investigaciones de DA realizadas en el IITCA, en donde se operaron digestores anaerobios sin calentamiento y tomando en cuenta los valores más altos de cada investigación obtuvimos un REM 82% más alto respecto a lo obtenido por Alcaraz-Ibarra (2019), 64% más alto respecto a Méndez-Yunda (2020) y un 16% más alto respecto a Moncivais-Gómez (2023).

Por tanto, la hipótesis se cumplió y el calentamiento del DAEC mejoró los REM, en específico en la tercera corrida fue en donde se mejoró en más del 50% respecto a experimentaciones de DA sin sistema de calentamiento realizadas en el IITCA años anteriores.

Esto representa un buen comienzo para el equipo de trabajo y el estudio de calentamiento de digestores anaerobios, debido a que el diseño del sistema de calentamiento resultó ser eficiente, y se puede mejorar solo modificando la configuración de operación (flujo de agua y biogás, tiempos de recirculación, etc.), por tanto, todavía hay múltiples opciones a experimentar para encontrar la configuración óptima.

9. RECOMENDACIONES

A partir de los datos obtenidos y observaciones durante esta investigación, se presentan las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones.

- Colocar sensores de temperatura a la entrada y salida del intercambiador de calor, para tener un registro del comportamiento de temperatura del agua al pasar por el serpentín de cobre y con ello poder tomar decisiones respecto a la configuración de calentamiento.
- Experimentar con otras configuraciones de calentamiento.
- Continuar con la búsqueda bibliográfica y el estudio de la transferencia de calor cuando uno de los fluidos permanece en modo estacionario.
- Mejorar el sistema de calentamiento para disminuir las pérdidas de calor hacia el ambiente.
- Diseñar un sistema para mejorar el control del flujo de biogás y poder mantenerlo constante durante el tiempo de calentamiento.
- Estudiar la proporción de LAP y ROC en el sustrato de codigestión y su efecto en la amortización de los ácidos grasos volátiles.
- Calentar el influente para intentar cubrir al 100% los requerimientos de energía del digestor anaerobio.
- Realizar análisis de AGV y amonio, para mejorar el monitoreo y poder aplicar acciones correctivas a tiempo.

10. REFERENCIAS

- Alcaraz-Ibarra, S. (2019). Influencia del tiempo de retención hidráulico sobre la codigestión anaerobia psicrofílica de lodo biológico [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua]. Repositorio institucional- Universidad Autónoma del Estado de México.
- Álvarez, R. & Lidén, G. (2008). The effect of temperature variation on biomethanation at high altitude. *Bioresource Technology,* 99, pp. 7278-7284.
- Arikan, O. A., Mulbry, W. & Lansing, S. (2015) Effect of temperature on methane production from field-scale anaerobic digesters treating dairy manure. *Waste Management*, 43, pp. 108-113.
- De Anda, T.A., García, G.E., Peña, C.A., Seminario, P.J. & Nieto, G.A. (2021). Residuos orgánicos ¿basura o recurso?, *Recursos Naturales y Sociedad*, 7 (3), pp. 19-42.
- Diario Oficial de la Federación de México (DOF). (2013). NMX-AA-007-SCFI-2013 Análisis de agua – Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (Cancela la NMX-AA-007-SCFI-2000).
- Diario Oficial de la Federación de México (DOF). (2015). NMX-AA-034-SCFI-2015 Análisis de agua - medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-034-SCFI-2001).
- Diario Oficial de la Federación de México (DOF). (2016). NMX-AA-008-SCFI-2016 Análisis de agua. - Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. - Método de prueba- (Cancela a la NMX-AA-008SCFI-2011).
- El-Mashad, H.M., Vanloon, W.K.P. & Zeeman, G. (2004a). Design of a solar thermophilic anaerobic reactor for small farms. *Biosystems Engineering*, 87 (3) (2004a), pp. 345-353.
- El-Mashad, H.M., Vanloon, W.K.P., Zeeman, G, Bot, G.P.A & Lettinga, G. (2003). A model of solar energy utilisation in the anaerobic digestion of cattle manure. *Biosystems Engineering*, 84 (2), pp. 231-238.

- El-Mashad, H.M., Vanloon, W.K.P., Zeeman, G, Bot, G.P.A & Lettinga, G. (2004b). Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure, *Bioresource Technology*, 95, pp. 191-201.
- Gao, S., Huang, Y., Yang, L., Wang, H., Zhao, M., Xu, Z., Huang, Z. & Ruan, W. (2015). Evaluation the anaerobic digestion performance of solid residual kitchen waste by $NaHCO_3$ buffering, *Energy Conversion and Management* ,93, pp.166–174.
- Guilford, N.G.H., Lee, H.P, Kanger, K., Meyer, T. & Edwards, E.A. (2019). Solid-State Anaerobic Digestion of Mixed Organic Waste: The Synergistic Effect of Food Waste Addition on the Destruction of Paper and Cardboard, *Environmental Science & Technology*, *53* (21), pp. 12677-12687.
- INEGI (2022). ESTADÍSTICAS A PROPÓSITO DEL DÍA MUNDIAL DEL MEDIO AMBIENTE (5 DE JUNIO) (en línea). Recuperado el 15 de diciembre de 2022 de https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2022/EAP_MedAmb22.pdf
- Kinnunen, M., Hilderbrandt, D., Grimberg, S., Rogers, S., & Mondal, S. (2015). Comparative study of methanogens in one- and two-stage anaerobic digester treating food waste. *Renewable Agriculture and Food Systems, 30*(6), pp. 515-523.
- Li, Y., Zhang, R., Liu, X., Chen, C., Xiao, X., Feng, L., He Y. & Liu, G. (2013). Evaluating Methane Production from Anaerobic Mono- and Co-digestion of Kitchen Waste, Corn Stover, and Chicken Manure, *Energy & Fuels*, *27* (4), pp. 2085-2091.
- Loosdrecht, M. C. M. van, Brdjanovic, D., Nielsen, P. H., & Lopez-Vazquez, C. M. (2016). *Experimental methods in wastewater treatment*. IWA Publishing.
- Méndez-Yunda, Y. D. (2020). Digestión anaerobia semicontinua de lodo activado con residuos orgánicos: efecto de la carga orgánica volumétrica [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua]. Repositorio institucional- Universidad Autónoma del Estado de México.
- Moncivais-Gómez, A. K. (2023). Modelaje del rendimiento específico de metano de un digestor psicrofílico con la curva modificada de Gompertz [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Interamericano

de Tecnología y Ciencias del Agua]. Repositorio institucional- Universidad Autónoma del Estado de México.

- Parra, O.D.L., Botero, L.M.A. & Botero, L.J.M. (2019). Biomasa residual pecuaria: revisión cobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos. *Revista UIS Ingenierías,* 18, pp. 149-160.
- Rusín, J., Chamrádová, K. & Basinas P. (2021). Two - stage psychrophilic anaerobic digestion of food waste: Comparison to conventional single – stage mesophilic process. *Waste Management*, 119, pp. 172-182.
- SEMARNAT. (2017). *Residuos Sólidos Urbanos (RSU)* (en línea). Recuperado el 16 de diciembre de 2022 de: https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu#:~:text=En%20M%C3%A9xico%20se%20generan%20diariamente,9.63%25%20de%20los%20residuos%20generados
- SENER. (2021). Lista de combustibles y sus poderes caloríficos 2021 que se considerarán para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo, así como los factores para determinar las equivalencias en términos de barriles equivalentes de petróleo (en línea). Recuperado el 25 de junio de 2024 de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/619062/Lista_Combustibles_2021_26feb2021.pdf
- The Engineering ToolBox (2003). *Solids, Liquids and Gases - Thermal Conductivities*. [online] https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html
- Tian, H., Duan, N., Lin, C., Li, X. & Zhong, M. (2015). Anaerobic co-digestion of kitchen waste and pig manure with different mixing ratios. *Journal of Bioscience and Bioengineering*,120(1), pp. 51-57.
- Wu, Mc., Sun, Kw. & Zhang, Y. (2006). Influence of temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of municipal organic solid waste. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*,7, 180–185.
- Zhang, Y., Banks, C.J. & Heaven, S. (2012). Co-digestion of source segregated domestic food waste to improve process stability, *Bioresource Technology*, 114, pp. 168–178.

- Zhang, T., Tan, Y. & Zhang X. (2016). Using a hybrid heating system to increase the biogas production of household digesters in cold areas of China: An experimental study. *Applied Thermal Engineering,* 103, pp. 1299-1311.
- Zhong, Y., Bustamante, R.M., Zhong, Y., Archer, S., Chen, R., Deitz, L., Hochhalter, D., Balaze, K., Sperry, M., Werner, E., Kirk, D. &, W. (2015). Using anaerobic digestion of organic wastes to biochemically store solar termal energy, *Energy,* 83, pp. 638-646.
- Zupančič, G.D. & Ros, M. (2003). Heat and energy requirements in thermophilic anaerobic sludge digestion, *Renewable Energy*, 28(14), pp. 2255-2267.