

SIMULACIÓN DE UN REACTOR UASB ASUMIDO COMO UN CSTR, UTILIZANDO UN MODELO BIOCINÉTICO COMPLETO

Juan M. Grosso P.^{1*}, Alejandro Deeb², Walter Vergara², Alexander Meneses J.¹

¹ Grupo de Investigación en Recursos-Energía-Sostenibilidad (GIRES),
Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB), Calle 48 #39-234, 5to piso Ed. de Ingenierías,
Bucaramanga, Colombia

² Latin America Environment Department, World Bank, 1850 I st. NW-Washington DC, USA CP. 20433

* Tel +57 (7) 6436111 Ext. 234, Fax +57 (7) 6571800 Ext. 351, jgrosso2@unab.edu.co

RESUMEN

Los digestores o reactores biológicos anaerobios de tipo UASB (Up-flow Anaerobic Sludge Blanket), han demostrado ser una tecnología robusta y adaptable al tratamiento de aguas residuales de baja, media y alta carga, capaz de producir biogás con altas concentraciones de metano. Aunque los UASB son unidades simples en su configuración y operación, su modelamiento y simulación son tareas paradójicamente complejas. Por consiguiente, no resulta evidente orientar la operación de un UASB hacia estándares de alto rendimiento y asegurar una disponibilidad confiable de biogás como fuente de energía. De esta manera, el presente artículo aborda un modelo para predecir la producción y composición de biogás en digestores UASB utilizados en el tratamiento de aguas residuales domésticas. El modelo utilizado asume el digestor UASB como un CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor) y aplica un modelo biocinético que discrimina la degradación de las fracciones elementales que conforman las principales cargas contaminantes: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Sólidos Suspendedos Totales (SST). Las simulaciones realizadas reproducen satisfactoriamente la producción de biogás y su composición, así como la remoción de DBO, DQO y SST, pero muestran deficiencias para reproducir algunos parámetros del efluente del UASB (i.e. alcalinidad, NTK), aspectos que serán objeto de discusión y análisis en el presente artículo.

(Trabajo propuesto para presentación oral)

1.- Introducción

El uso intensivo del biogás rico en metano ($\text{CH}_4 > 60\%$), producido en procesos de degradación biológica anaerobia de residuos orgánicos (líquidos o sólidos), es una de las principales fuerzas impulsoras de la provisión “ambientalmente compatible” de energía renovable de bajo costo [1]. En general, el uso energético del biogás contribuye a:

- i. La reducción de emisiones de gases efecto invernadero, mediante el desplazamiento de carbono fósil por energía primaria de la biomasa y conversión de CH_4 en CO_2 [2].
- ii. Una mayor seguridad energética a escala regional y nacional, a partir del concepto de generación descentralizada de energía apoyada en pequeñas plantas de combustión de biogás, que son instaladas cerca de los usuarios, para reducir pérdidas y costos de transporte de electricidad hacia sitios aislados o de difícil acceso [3].
- iii. Mejorar el balance económico de plantas de tratamiento de residuos, gracias a la implementación de sistemas de cogeneración para el autosostenimiento energético de procesos de descontaminación local y la venta de excedentes de energía a terceros (i. e. electricidad, vapor) [4-6].
- iv. Estimular la evolución hacia la economía del “biohidrógeno” a partir de biogás con mayores contenidos de metano y menores niveles de impurezas, mejorando las condiciones técnicas para la producción de hidrógeno por reformado catalítico y la generación de energía a pequeña escala con celdas combustible [7-9].

En este contexto, la aplicación de técnicas y métodos de modelamiento-simulación con bajos requerimientos de experimentación, se presentan como una estrategia clave para el desarrollo de nuevos procesos de digestión anaerobia y para la optimización de procesos o tecnologías existentes como los digestores UASB, con el ánimo de mejorar el potencial técnico y económico del metano contenido en el biogás con fuente primaria de energía.

A la fecha se han desarrollado varios modelos matemáticos pseudo-empíricos que buscan obtener esquemas estructurados que incluyen la mayoría de los procesos bioquímicos y fisicoquímicos que pueden tener lugar dentro de un UASB (hidrólisis, fermentación, acidogénesis, metanogénesis, solubilidad de gases, etc.), pero que requieren la estimación

de una gran cantidad de parámetros biocinéticos, lo cual representa un primer nivel de dificultad [10-13]. Por otra parte, la distribución heterogénea de biosólidos al interior de estos reactores (zona de lodo digerido o de fondo, zona de lodo activo o manto de lodos, zona de agua clara y zona de flotantes), hacen que la aplicación de un modelo biocinético único y válido en la totalidad del volumen del reactor sea una aproximación incierta. Por esta razón, aplicar un modelo de tanque continuo de mezcla completa (CSTR) es sólo una aproximación medianamente aceptable para la zona de manto de lodos, que a pesar de sus limitaciones ha sido habitualmente empleada para simplificar la descripción y el modelado de la degradación de la carga orgánica en estas unidades.

El presente trabajo aborda el ajuste de un modelo biocinético de un digestor anaerobio asumido como CSTR, proveído como objeto de programación por el software comercial GPS-X [14], para evaluar la producción de biogás en los reactores UASB de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Río Frío situada en el Área Metropolitana de la Ciudad de Bucaramanga (Colombia). El estudio demuestra que el ajuste biocinético tomando datos de la literatura y datos de campo, aplicado a un modelo CSTR, permite estimar coherentemente la producción de biogás y su concentración de metano (CH_4). Estas predicciones son muy cercanas a las obtenidas con las metodologías del IPCC. También se obtienen resultados congruentes en los promedios de remoción de DBO, DQO y SST, acordes a la operación de los UASB tomados como referencia. Aún así, se ha determinado que los niveles de alcalinidad y NTK en el efluente de la unidad anaerobia no pueden modelarse correctamente, mostrando una incongruencia con los resultados operacionales y la tipología de los procesos bioquímicos esperados.

Además del análisis del modelo y de los resultados de modelamiento, el presente artículo rescata al gran interés energético-ambiental que ha recuperado la valorización energética del biogás generado en unidades UASB utilizadas en sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas y su posibilidad de aplicarla como estrategia de reducción de emisiones de metano, uno de los más importantes gases de efecto invernadero (GEI) contemplados en los objetivos de mitigación del cambio climático [7, 15-16].

2.- Condiciones experimentales

Modelo matemático y ajuste de parámetros del digestor: dado que el objeto digestor anaerobio CSTR que se empleó en el software GPS-X 5.0 está definido en su concepto para tratamiento de biosólidos y no para corrientes de residuos diluidas, fue necesario realizar un análisis de sensibilidad de las variables y constantes que componen su modelo matemático *basic* (véase Tabla 2), ajustando su valor iterativamente con el fin de encontrar un conjunto de constantes biocinéticas y parámetros estequiométricos que permitan emular la realidad operacional de los reactores UASB partiendo de la información del afluente de entrada, de las eficiencias de remoción reportadas por los operadores de la PTAR (véase Tabla 1) y de los valores recomendados por la IWA para digestión anaerobia mesofílica (18°C - 40°C).

Con este procedimiento soportado en las utilidades avanzadas de GPS-X para estimación de parámetros y análisis de sensibilidad, se propusieron 4 escenarios de modelización resultantes de combinaciones de valores cinéticos y estequiométricos posibles y aceptables para tratar un afluente en estado pseudo-estable (sin arrancada ni parada de UASB) con un tiempo de retención hidráulico de 6 a 8 horas y una temperatura de reactor de 35°C, con el fin de ajustar la producción de biogás, buscando una conciliación con los factores de producción de metano (CH₄) establecidos por los lineamientos del IPCC¹ para aguas residuales domésticas. Ahora bien, dado que el modelo matemático interno de GPS-X para el digestor anaerobio calcula un biogás compuesto sólo por CH₄ y CO₂, y no tiene en cuenta la realidad geométrica y operacional del reactor UASB, se decidió corregir el resultado simulado de producción de metano acorde a las pérdidas asociadas a esta tecnología. Los factores correctivos empleados son el resultado de numerosos estudios sobre reactores UASB operando en Brasil [17], y hacen relación al porcentaje de pérdidas en forma de gas residual, fugas en forma de metano disuelto en el líquido, y otras pérdidas operativas. Estos valores se resumen en la tabla 3.

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Revised 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Paris, France, 2006. Volume 5. Chapter 6.

Tabla 1 Principales parámetros operacionales de un reactor UASB en la PTAR Río Frío

Parámetros	Unidades	Valores
Temperatura	°C	35
Volumen total	m ³	3400
Superficie	m ²	800
Concentración del afluente	g COD/m ³	566
Tiempo de retención hidráulico	h	6 – 8
Caudal de Afluente (diseño)	L/s	180
Máxima producción medida de biogás	m ³ /día	1800
Producción media de biogás	m ³ /día	1300

Tabla 2 Matriz de Petersen para Digestión Anaerobia –Modelo Básico

Componente	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Tasa del proceso, ρ_j
j	Proceso	X_{II}	X_{MH}	X_{VSS}	S_{LF}	S_{CH4}	S_{CO2T}	S_Z	S_{TOX}	S_{NH}	
1	Hidrólisis			-1	Y_A		$\frac{Y_A}{g_{OVI} \times 1000}$			Y_F	$k_{CO} \cdot S_{VSS}$
2	Crecimiento de metanógenos		1		$-\frac{1}{Y_C}$	Y_E	$\frac{Y_D}{g_{OVI} \times 1000}$			$-\frac{1}{Y_G}$	$\frac{\mu_{X_{MH}} \cdot X_{MH}}{1 + \frac{K_s}{S_{LFN}} + \frac{S_{LFN}}{K_{LA}} + \frac{S_{NHN}}{K_{IN}}}$
3	Decaimiento de metanógenos		-1								$k_D \cdot X_{MH}$
4	Toxicidad		-1								$k_{TOX} \cdot S_{TOX}$
5	Degradación de sustancias tóxicas								-1		$k_B \cdot S_{TOX}$
6	Transferencia de CO ₂ a la fase gas						1				$k_{LA} \cdot (Henry_{CO_2} \cdot g_{CO_2} - H_2CO_3)$
		Material inorgánico inerte particulado [gCOD/m ³]	Metanógenos [gCOD/m ³]	Sólidos suspendidos volátiles [gVSS/m ³]	Ácidos grasos volátiles totales [gCOD/m ³]	Gas Metano (CH ₄) [gN/m ³]	CO ₂ soluble total [gCOD/m ³]	Cationes netos [moles/L]	Substancia tóxica [g/m ³]	Amonio libre e ionizado [gN/m ³]	

Tabla 3 Pérdidas porcentuales de metano en un reactor UASB

Tipo de pérdida	Unidad	Valor inferior	Valor medio	Valor superior
Pérdida como gas residual (p_w)	%	2,5	5,0	7,5
Otras pérdidas (p_o)	%	2,5	5,0	7,5
Pérdida como efluente (p_L)	mg/L	15,0	20,0	25,0

De esta manera el CH₄ real disponible para recuperación de energía será:

$$CH_{4\text{corregido}} = CH_{4\text{simulado}} (1 - p_W - p_O) - \frac{Q_{\text{afluente}} \cdot p_L \cdot f_{CH_4}}{f(T)}$$

donde:

$$f(T) = \frac{P \times K_{COD}}{R \times (273 + T)} : \text{factor de corrección según temperatura operacional } \left(\frac{kgCOD}{m^3} \right)$$

$$f_{CH_4} = \text{factor de conversión de masa de metano en masa de COD } \left(\frac{4kgCOD}{kgCH_4} \right)$$

Ensayos realizados:

Para el análisis comparativo de los resultados obtenidos en la estimación de la producción de biogás empleando este modelo virtual, la corrección por pérdidas y la metodología IPCC, se realizaron las siguientes simulaciones:

- 10 casos de operación bajo cargas diferentes manteniendo fijo el caudal promedio del afluente de la PTAR, variando la BOD desde 100 g/m³ hasta 1000 g/m³.
- 10 casos de operación bajo una misma carga orgánica pero a caudal de afluente variable entre 20 y 200 L/s.

3.- Resultados y discusión

Análisis de sensibilidad de parámetros:

En términos generales, se encontró que los parámetros que impactan en mayor grado la simulación de la actividad del digester UASB son: el volumen inicial de agua en el reactor, el volumen de la fase gaseosa, el caudal de afluente, las concentraciones iniciales de metanógenos y ácidos grasos volátiles, las presiones parciales iniciales del CH₄ y el CO₂, y la temperatura y pH del reactor. El cambio en estas variables permitió corroborar que la gestión de un digester anaerobio debe asegurar unas condiciones y concentraciones iniciales tales que permitan sostener la fase de crecimiento exponencial bacteriano y alcanzar su fase útil para metanización sostenida. Las constantes cinéticas que tienen mayor influencia en la simulación son: la tasa máxima de crecimiento específico de microorganismos metanógenos, el coeficiente de demi-saturación de la anaerobiosis, la tasa

de decaimiento de la biomasa, la constante de hidrólisis, la constante de inactivación, y los coeficientes de corrección por temperatura.

Ajuste biocinético del modelo

De los escenarios biocinéticos ensayados, los escenarios 2 y 4 mostraron representar con mayor fidelidad el comportamiento y rendimientos de los UASB instalados en la PTAR Río Frío. La Tabla 4 resume los indicadores de eficiencia de los escenarios simulados, cercanos a la realidad operacional de la planta, que en promedio maneja una producción de 1300 m³/d de biogás con 70% CH₄, una remoción del 50% en TSS y 73% de remoción de carga orgánica expresada en términos de BOD.

Tabla 4 Resultados de modelización del reactor UASB

Indicador de Eficiencia	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Rendimiento PTAR Río Frío
% Remoción BOD	89,07	74,40	89,60	81,44	70-75
% Remoción TSS	20,13	57,05	24,82	40,68	50-60
Producción de Biogás [m ³ /d]	1346,00	1522,00	1273,00	1517,00	1300-1800
% Metano en el Biogás	71,44	71,81	73,71	70,69	60-80

La Tabla 5 y Tabla 6, contienen las constantes cinéticas y los parámetros estequiométricos utilizados en los escenarios de modelización 2 y 4, que permitieron calibrar el objeto de programación *digestor anaerobio* para emular la realidad de los UASB en estudio. Aún así, para el detalle de los próximos resultados, se emplean los relacionados al escenario 2 únicamente.

Tabla 5 Constantes biocinéticas ajustadas para el reactor UASB modelado

Constantes cinéticas de la digestión anaerobia	Símbolo	Escenario 2	Escenario 4	Unidades
Tasa máxima de crecimiento de metanógenos	μ_{mh}	29	15,3	[1/d]
Coeficiente de saturación	K_s	0,005	0,001	[moles/l]
Constante de inhibición de VaH	K_{ia}	0,0008	0,0008	[moles/l]
Constante de inhibición para el NH ₃	K_{in}	0,0018	0,0018	[moles/l]
Tasa de decaimiento de metanógenos	k_d	0,04	0,02	[1/d]
Coeficiente de inactivación	k_{tox}	0,5	0,5	[1/d]
Constante de hidrólisis de VSS	k_{co}	10	4,5	[1/d]
Tasa de degradación de sustancias tóxicas	k_b	0	0	[1/d]
Coeficiente de temperatura para metanógenos	$f_{\mu_{mh}}$	1,07	1,07	[-]
Coeficiente de temperatura para hidrólisis	$f_{k_{co}}$	1,07	1,07	[-]

Tabla 6 *Parámetros estequiométricos*

Rendimientos	Símbolo	Escenario 2	Escenario 4	Unidades
VFA/VSS	Ya	1	0,82	[gCOD/g VSS]
CO ₂ /VSS	Yb	0,8	1,45	[lCO ₂ /g VSS]
X _{mh} /VFA	Yc	0,065	0,002	[gCOD/g COD]
CO ₂ /X _{mh} COD	Yd	5	5	[lCO ₂ /g COD]
CH ₄ /COD	Ye	0,0102	0,34	[m ³ CH ₄ /gX _{mh} COD]
Producción de Amonio/ VSS	Yf	0,059	0,059	[gN/g VSS]
COD/Consumo de amonio	Yg	5,9	5,9	[gX _{mh} /gN]

Estimación de la producción de biogás:

Los resultados de producción de biogás en diferentes casos de carga BOD y caudal fijo (180 L/s), muestran que los escenarios cinéticos seleccionados permiten realizar una estimación bastante ajustada a la que arroja los lineamientos del IPCC, en especial al aplicar la corrección por pérdidas de metano en el reactor UASB. Las simulaciones muestran que para el escenario 2 existe un error relativo de 4,05% en la estimación de emisiones de metano (véase tabla 7 y figura 2).

Se pudo observar que al aumentar la carga orgánica en el afluente, la producción de biogás se incrementa ya que la principal actividad microbiana dentro del reactor se da por la conversión de dicha carga en biogás, pero es importante notar que la concentración de metano disminuye sutilmente debido a la diferencia en la cinética de las bacterias involucradas en la anaerobiosis, donde los metanógenos son el factor limitante por tener menor tasa de consumo de sustrato, lo que favorece que por unidad de tiempo, las bacterias acidogénicas y acetogénicas generen mayores concentraciones de CO₂, H₂, y H₂S. Por otra parte, los ensayos de simulación con carga constante y caudal variable permitieron observar la presencia de un máximo relativo en la producción de biogás (véase tabla 8), lo cual nos indica el afluente ideal a tratar para un mejor aprovechamiento de los reactores. El caudal de máxima eficiencia debería ser alrededor de los 160 L/s en cada reactor (véase figura 3).

Tabla 7 Desempeño y estimación de metano para reactor UASB Río Frío

Desempeño de reactor UASB para caudal fijo y carga variable - ES CENARIO 2										
Parámetro										
BOD _{in} [gO ₂ /m ³]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
COD _{in} [g/m ³]	174,00	347,00	521,00	694	868	1042	1215	1389	1563	1736
TSS [g/m ³]	33,39	66,79	101,20	134,60	168,00	202,40	235,60	269,20	302,50	336,90
BOD _{out} [gO ₂ /m ³]	58,44	79,49	82,71	85,91	89,14	92,38	95,59	98,87	102,20	105,50
COD _{out} [g/m ³]	172,50	241,90	282,00	322,00	362,00	402,10	441,80	482,20	522,30	562,30
Biogás [m ³ /d]	5,35	732,60	1639,00	2759,00	3939,00	5159,00	6401,00	7661,00	8942,00	10230,00
% Metano	84,80	78,11	72,78	69,25	66,70	64,81	63,38	62,22	61,32	60,58
Estimación de Metano generado [m ³ /d]										
CH ₄ simulado	4,54	572,23	1192,86	1910,61	2627,31	3343,55	4056,95	4766,67	5483,23	6197,33
CH ₄ corregido	3,59	514,52	1073,09	1719,06	2364,09	3008,70	3650,77	4289,52	4934,42	5577,11
CH ₄ IPCC	7,35	515,15	1171,46	1823,36	2480,17	3136,48	3789,85	4444,70	5101,01	5752,91
% error	51,15	0,12	8,40	5,72	4,68	4,07	3,67	3,49	3,27	3,06

Tabla 8 Desempeño y estimación de biogás para caudal variable

Desempeño de reactor UASB para carga fija y caudal variable - ES CENARIO 2										
Parámetro										
Q _{in} [L/s]	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
COD _{in} [g/m ³]	566,00	566,00	566,00	566,00	566,00	566,00	566,00	566,00	566,00	566,00
TSS _{out} [g/m ³]	53,27	62,56	71,10	78,89	86,04	92,64	98,74	104,30	109,70	110,90
BOD _{out} [gO ₂ /m ³]	6,48	12,69	19,10	26,86	33,16	41,31	50,89	63,22	83,33	92,96
COD _{out} [g/m ³]	94,92	118,00	139,90	161,10	182,00	202,90	224,90	249,60	283,40	297,50
Biogás [m ³ /d]	487,80	906,00	1262,00	1559,00	1800,00	1982,00	2095,00	2114,00	1937,00	1796,00
% Metano	65,03	66,15	67,17	68,11	68,98	69,78	70,52	71,17	71,71	71,79

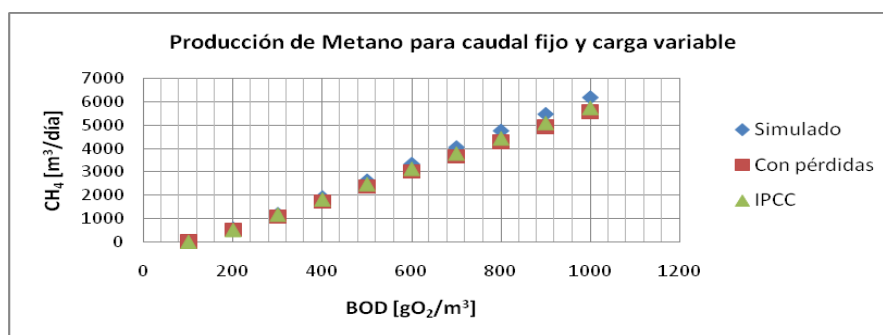


Figura 2 Producción de biogás para carga variable

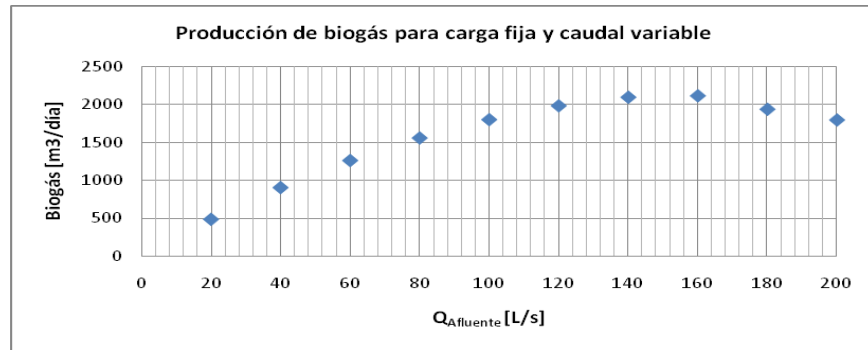


Figura 3 Producción de biogás para caudal variable

Habiendo calibrado y obtenido un comportamiento validado del modelo virtual del UASB como un CSTR ajustado biocinéticamente, se analizó la confiabilidad del mismo y los rendimientos globales de la planta bajo diferentes escenarios de operación de la PTAR Río Frío Híbrida (UASB+Lodos Activados). A continuación se muestran los resultados de los 7 ensayos realizados con el modelo final de esta investigación.

Tabla 9 Resumen de resultados de modelización-simulación del Modelo Virtual 3

PARÁMETRO OPERACIONAL	EC2							
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	
Caudal de entrada (m³/d) (% UASB)	55990 (80%)	55990 (80%)	55990 (80%)	55990 (80%)	55990 (80%)	55990 (90%)	55990 (100%)	
Caudal de reciclo de lodos (m³/d)	19597	19597	19597	19597	27995	19597	19597	
Caudal de reciclo interno (m³/d)	11200	11200	11200	11200	11200	11200	11200	
Aireación (m³/h)	16500	16500	40000	16500	16500	16500	16500	
SST en clarificador (mg/L)	2500	4000	4000	2500	2500	2500	2500	
Respuesta en la calidad del efluente UASB								
SST (mg/L)	102,90	108,00	109,00	126,30	101,20	107,30	111,40	
% Remoción	62,16%	61,78%	61,43%	65,23%	62,27%	60,29%	58,53%	61,67%
DBO (gO2/m³)	66,86	67,14	68,14	68,56	66,78	75,92	85,22	
% Remoción	79,79%	79,83%	79,53%	79,56%	79,75%	77,00%	74,08%	78,51%
DQO (g/m3)	244,90	248,30	249,30	261,80	243,60	263,90	282,70	
% Remoción	57,90%	88,64%	88,47%	59,38%	57,98%	54,59%	51,13%	65,44%
Biogás	2038,00	2133,00	2134,00	2482,00	2004,00	2054,00	2034,00	
% CH4	66,05%	65,21%	65,18%	62,29%	66,37%	67,28%	68,39%	65,82%
pH	7	7	7	7	7	7	7	
Alcalinidad (mgCaCO3/m3)	1844	1899	1899	2090	1824	1777	1716	

Se pudo observar también que el perfil de alcalinidad total se comporta acorde a los niveles de operación de un digestor anaerobio (véase Tabla 9), pero ajenos a la realidad en la alcalinidad soluble presente en el efluente de los UASB de Río Frío.

4.- Conclusiones

- Con la estimación de producción de biogás, se pudo realizar a su vez una valorización energética simple de acuerdo a su potencial como sustituto de combustible ($PCI_{CH_4}=35.9 \text{ MJ/m}^3$). En este caso solo se estimó el aprovechamiento energético de este subproducto gaseoso para ser transformado en energía eléctrica equivalente y determinar la capacidad de autonomía eléctrica que podría tener la PTAR Río Frío. Con el escenario de menor producción de biogás (1522 m³/d-uasb) analizado y sin estrategias de optimización energética por operación de la planta, se prevé un abastecimiento de energía eléctrica del 59.45% de la demanda total de la planta, lo que representa un ahorro anual de \$1105.812.780 de pesos colombianos. Siguiendo algunas estrategias operativas en el tratamiento secundario (aerobio), la capacidad de recuperación de energía a partir del biogás alcanzaría cerca del 90% del total requerido en potencia eléctrica.
- Los niveles de alcalinidad y en el efluente de la unidad anaerobia no pueden modelarse correctamente, mostrando una incongruencia conceptual con los resultados operacionales y la tipología de los procesos bioquímicos esperados. Esta incongruencia puede provenir de que en un reactor CSTR, parte de la alcalinidad atrapada en la zona de lodos densos, se estaría liberando saliendo como excedente en el agua tratada. Para verificar esta hipótesis y corregir el modelo, actualmente se está desarrollando un estudio diferencial de los siguientes parámetros: (i) alcalinidad total y α -alcalinidad y (ii) formas biogénicas del nitrógeno, tanto en la fase clara del reactor como en la fase de lodos densos.

5.- Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Banco Mundial División Latinoamérica y a la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), autoridad ambiental en el área metropolitana de la ciudad de Bucaramanga (Colombia), por la financiación de esta investigación. Se extiende este reconocimiento a la Empresa Pública de Alcantarillado de Santander (EMPAS – S.A. E.S.P.), operadora de la PTAR “Rio Frio” por facilitar el acceso a las instalaciones y a información operacional.

6.- Referencias

- [1] A.P.C. Faaij, *Energy Policy*, 34, 322, (2006).
- [2] Sitio Web de la UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change) seccion Clean Development Mechanism: <http://cdm.unfccc.int/index.html>
- [3] EEA - European Environment Agency. *EEA Report No 7/2006*, p. 70
- [4] G. Wiltsee, H. Emerson, *BioCycle*, 45(2), 53-55, (2004).
- [6] A. J. Lutz, *Energy Engineering*, 102(1), 21, (2005).
- [7] A. Meneses et al., *Clean: Soil, Air, Water*, 36(3), 788, (2008).
- [8] D.B. Levin, R. Chahine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 4962, (2010).
- [9] D.G. Vlachos, S. Caratzoulas. *Chemical Engineering Science*, 65, 18, (2010).
- [10] M. Henze et al., *Water Science Technology*, 39 (1), 165, (1999).
- [11] D. J. Batstone et al., *IWA Scientific and Technical Report #13*. IWA Publishing (UK). 2002.
- [12] S. J. Mu et al. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 46, 1519, (2007).
- [13] P. Bhunia, M.M. Ghangrekar. *Bioresource Technology*, 99, 2132, (2008).
- [14] Hydromantis Inc. GPS-X 5.0 Technical Reference, Chapter 10: Digestion Models, 2006.
- [15] D. Rosso, M.K. Stenstrom, *Chemosphere*, 70(8), 1468, (2008).
- [16] Sh. M. Bani, et al. *Water Research*, 43(10), 2679, (2009).
- [17] Chernicharo, C., et al. Controle de emissões gasosas e aproveitamento energético de biogás em reatores anaeróbios. Universidad Federeal de Minas Gerais. (2009).