



POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE LODOS ACTIVADOS

Sandoval Yoval Luciano¹, Mantilla Morales Gabriela², Ramírez Camperos Esperanza M.³, Gasca Álvarez Sergio⁴, Navarro Franco Javier⁵, Hernández Cruz Norma⁶, García Rojas Juan L.⁷, Esquivel Sotelo Alberto⁸, Calderón Mólgora César G.⁹

^{1,2,3,5,6,7,8,9} Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532. Progreso, Jiutepec, Mor. C.P. 62550. (777)329.36.22

⁴ Secretaría de Energía. Insurgentes Sur # 890. Col. del Valle. México D.F., C.P. 03100. (55)5000.6000 Ext.2316

¹lucsand@tlaloc.imta.mx, ²mantilla@tlaloc.imta.mx, ³eramirez@tlaloc.imta.mx, ⁴sgasca@energia.gob.mx,

⁵javinavarrorfranco@gmail.com, ⁶noher.eoa@gmail.com, ⁷jgarcia@tlaloc.imta.mx, ⁸alberto_e84@hotmail.com,

⁹calderon@tlaloc.imta.mx

RESUMEN

En México de acuerdo con el Inventario Nacional de Plantas que reporta la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2015), las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales que están en operación son 2 477, con una capacidad instalada de 177.97 m³/s y un caudal tratado de 120.90 m³/s, de las cuales 746 son de lodos activados. Este proceso genera una gran cantidad de lodos biológicos de desecho, sin embargo, si éstos se estabilizan mediante procesos anaerobios, son una fuente de energía renovable al generar biogás, rico en metano, que puede emplearse para generar parte de la energía requerida por los equipos electromecánicos del sistema de tratamiento. Como objetivo del estudio, se evaluaron 93 plantas de lodos activados con un caudal igual o superior a los 200 L/s con posibilidades de cogenerar energía y así reducir sus costos de operación. Los resultados muestran que de las modalidades de lodos activados en operación en México, la convencional es la que más energía eléctrica puede generar (0.32 kW/L), además puede obtener cerca del 100% de sus requerimientos energéticos, haciéndolo económicamente viable. Por lo que, el proceso de lodos activados puede ser sustentable en cuestiones energéticas y con costos de operación bajos. Así, la energía eléctrica proveniente de la combustión del biogás, producto del tratamiento de los lodos residuales, debe ser vista como una fuente de energía renovable y limpia, pues reduce la emisión de gases de efecto invernadero al disminuir el consumo de las fuentes convencionales de energía.

Palabras clave: Tratamiento de aguas residuales, lodos activados, biogás, metano, energía

INTRODUCCIÓN

A diciembre de 2015 existen en México 2 477 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación, con un caudal tratado de 120.9 m³/s. El proceso más utilizado es el de lagunas de estabilización, aplicado en 752 plantas, equivalente al 30.3% y un caudal de 14.16 m³/s. Le sigue el de lodos activados que se aplica en 746 plantas, 30.1%, pero con un caudal de tratamiento de 67.06 m³/s, que representa el 55.5%. En tercer lugar figura el proceso de reactor anaerobio de flujo ascendente, utilizado en 140 plantas, 5.6 %. En este punto se hace hincapié en la relevancia del proceso de lodos activados, ya que es actualmente el preferido para el tratamiento de agua residual en el país, sin embargo, es el proceso que genera la mayor cantidad de lodos residuales. Por lo que, en éste tipo de tratamiento se deben considerar dos procesos: el del agua per se, y el de los lodos residuales, subproducto del tratamiento del agua.

El origen, la cantidad y características de los lodos generados en una planta de tratamiento de agua residual (PTAR) afectan significativamente la línea de lodos y la del agua. En la línea de lodos, el criterio de diseño establecido por los sólidos, afecta el tamaño de las unidades del proceso, el periodo de operación, y los costos totales

Por lo tanto, el tratamiento y disposición de lodos biológicos de plantas de lodos activados es una parte muy importante dentro del tratamiento del agua residual, ya que llega a

representar hasta un 50% de la infraestructura y del costo de operación.

Las principales fuentes de generación de lodos son el sedimentador primario y el sedimentador secundario. Estos lodos por separado o en forma conjunta llegan al sistema de tratamiento, que generalmente inicia con el espesamiento del lodo secundario y una posterior digestión aerobia o anaerobia y finalmente una deshidratación.

La producción de lodos de aguas residuales municipales se estimó en 640 millones Ton/año en base seca (SEMARNAT, 2008) y esta cantidad se incrementó en los años subsecuentes gracias al programa de construcción de grandes plantas de tratamiento, siendo la principal de ellas la PTAR Atotonilco, que servirá a la ciudad de México y gran parte de la zona conurbada.

La normatividad actual (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002) señala que los lodos residuales deben ser estabilizados antes de su disposición final y/o su reúso.

Los lodos se estabilizan para reducir patógenos, eliminar olores ofensivos y para reducir o eliminar el potencial de descomposición o putrefacción que desarrolla olores y atracción de vectores. Los procesos de estabilización pueden producir diferentes calidades de lodos o biosólidos dependiendo del tipo de estabilización que proporcionen. Además, existen muchos procesos térmicos para la destrucción de contaminantes del lodo o producir combustible: como la oxidación supercrítica, la oxidación térmica con

“Norteamérica y el Caribe en el camino hacia el desarrollo sostenible”

plasma, la vitrificación, la gasificación, producción de combustible, entre otras tecnologías actualmente en desarrollo.

En la mayor parte de los procesos de tratamiento de lodos utilizados en México se requiere de energía eléctrica. Pero cuando éstos cuentan con un proceso de tratamiento de lodos anaerobio, su requerimiento es muy bajo, debidos a que se genera biogás, que puede ser aprovechado en la producción de energía. Esta energía se utiliza en el tratamiento de las aguas y de los lodos residuales y así se disminuyen los costos de operación, y también se coadyuva en la disminución de las emisiones a la atmósfera al no utilizar las fuentes convencionales de energía eléctrica.

Generalmente, las plantas con caudales mayores a 250 L/s tienen un tren de lodos que consiste en: espesamiento por gravedad, estabilización aerobia y deshidratación en filtros de banda. Algunas plantas de esta capacidad han implementado la estabilización anaerobia como proceso de tratamiento de lodos y cuentan con instalaciones para almacenar el biogás y quemarlo.

En México, algunos ejemplos de plantas de tratamiento con una capacidad mayor a 2 m³/s que tienen implementado el proceso de estabilización anaerobia de los lodos son: Planta de tratamiento de aguas residuales de León, Guanajuato y las plantas de tratamiento Norte y Dulces Nombres, de la ciudad de Monterrey, Nuevo León. La planta de tratamiento de aguas residuales municipales de León, Guanajuato cuenta con infraestructura para la limpieza y el uso del biogás en la generación de energía eléctrica. Esta inversión le ha permitido generar energía y disminuir en un 40 % la tarifa por consumo de energía eléctrica (Comunicación directa PTAR León, Guanajuato). Otro ejemplo, es la planta de San Pedro Mártir, en la ciudad de Querétaro, que trata por lodos activados 750 L/s y los lodos primarios y biológicos con un sistema anaerobio, por lo que cuenta con el sistema para generar el 90% de energía que requiere para su operación (Comunicación directa PTAR San Pedro Mártir, Querétaro).

Actualmente, se encuentra en etapa de pruebas de operación la PTAR Atotonilco, la cual tendrá capacidad de tratar 23 m³/s mediante tratamiento biológico y 12 m³/s por medio de tratamiento fisicoquímico. Para el tratamiento de lodos residuales la planta tendrá un proceso de estabilización anaerobia con un sistema de cogeneración de energía eléctrica con el fin de poder emplear biogás (Visita en el sitio).

A continuación, se presenta una lista de las PTARs que tienen estabilización anaerobia de los lodos biológicos residuales y además cuales están ya generando energía eléctrica.

Tabla 1. PTARs con estabilización anaerobia y generación de energía eléctrica en México

PTAR	Estado	Uso de biogás
La Paz	BCS	Quemador
Villa Álvarez	COL	Generación energía eléctrica
Chihuahua Norte	CHIH	Quemador
Chihuahua Sur	CHIH	Quemador
Juárez Norte - Sur	CHIH	Quemador/pruebas de generación
Principal	COAH	Generación energía eléctrica
Purísima del Rincón	GTO	Generación energía eléctrica y quemador
León	GTO	Generación energía eléctrica
Atotonilco	HGO	En prueba de operación

PTAR	Estado	Uso de biogás
Agua Prieta	JAL	Generación energía eléctrica
El Ahogado	JAL	Generación energía eléctrica
SEAPAL Norte II	JAL	Quemador
Norte	NL	Quemador
San Pedro Mártir	QRO	Generación energía eléctrica
Tanque Tenorio	SLP	Quemador
Hermosillo	SON	En prueba de operación

Lo anterior permite establecer que en México el sistema de lodos activados, además de ser el más empleado para el tratamiento de las aguas residuales, presenta un amplio potencial para la generación de energía que puede ser utilizada en las mismas instalaciones, y así abatir costos de operación, haciendo que este tipo de tratamiento sea más sustentable y amigable con el medio ambiente.

Como objetivo del estudio, se pretende evaluar 104 plantas de lodos activados en México con un caudal igual o superior a los 200 L/s, para establecer cuáles son sus posibilidades de cogenerar energía y así reducir sus costos de operación.

METODOLOGÍA

1. Selección y visitas técnicas a las PTARs con caudal de diseño mayor o igual a 200 L/s

De acuerdo al Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento (CONAGUA 2015), de las 760 PTARs con proceso de lodos activados mencionadas, solo 104 de ellas tiene un caudal mayor o igual a los 200 L/s (Tabla 2).

Tabla 2. PTARs seleccionadas para posible generación de energía eléctrica en México

ESTADO	PTAR	PROCESO	Ton DBO/d	Consumo de EE (MWh/año)
AGS	Cd. Aguascalientes	FP + LAC	24.26	8,234
	Los Arellano	AE-Dn	3.61	3,148
	Presa El Cedazo	LAC	4.39	629
	Jesús María	AE/Zanja	2.68	1,239
	Pabellón de Arteaga	LAC	2.22	1,293
	Rincón de Romos	LAC	1.67	1,260
BC	El Gallo	LAC	7.49	2,061
	El Naranjo	AE/Zanja	13.66	5,685
	Termoeléctrica Azteca (La Rosita)	AE/Zanja	4.54	3,649
	Ing. José Arturo Herrera Solís	AE/Zanja	9.37	7,446
	La Morita	AE/Zanja	6.91	4,045
	Binacional O Pitar	LAC	37.81	11,500
BCS	La Paz	LAC	14.52	2,803
COAH	Cd. Acuña	AE	4.87	1,727
	PTAR 3 AHMSA	LAC-Dn	12.03	4,391
	Piedras Negras	AE/Zanja	10.89	9,713
	Principal	LAC-Dn	37.26	7,726
COLIMA	Colima-Villa de Álvarez	LAC-Dn	11.02	6,701
	Salagua	LAC		
	Tecomán	AE		
CHIAPAS	Tapachula Sur Oriente	RAFA + LAC		
CHIH	Chihuahua Norte	LAC	8.07	5,390
	Chihuahua Sur	LAC	26.83	8,740

"Norteamérica y el Caribe en el camino hacia el desarrollo sostenible"

ESTADO	PTAR	PROCESO	Ton DBO/d	Consumo de EE (MWh/año)
	Planta Sur Sur	PA + LAC		
	Planta Sur	AE	32.09	16,887
	Planta Norte	AE	13.14	5,390
	Nuevo Casas Grandes	AE	3.80	2,712
CD MÉX	Santa Fe	LAC-Dn	1.12	512
	Coyoacán	LAC	3.46	2,681
	San Juan de Aragón	LAC	3.02	1,876
	Cd. Deportiva	LAC	1.43	1,179
	Cerro de la Estrella	LAC-Dn	56.25	23,652
	El Llano	LAC	2.07	
	San Lorenzo	AE	1.30	
DGO	Durango Sur	AE-Dn	4.41	5,683
	Cd. Lerdo	AE-Dn	2.96	2,998
GTO	Principal (Planta Poniente)	AE-Dn	14.00	3,561
	Irapuato II	AE/Zanja	8.91	2,969
	León (Planta Municipal)	AE	60.92	11,397
	Pemex Salamanca	AE	3.18	833
	Salamanca (Municipal)	LAC	5.54	2,096
	La Purísima	LAC	3.24	1,243
GRO	Aguas Blancas	AE	25.66	15,263
	Renacimiento	AE	10.37	5,550
	Club de Golf I	AE	6.16	3,469
JAL	Lagos de Moreno	AE	3.56	1,923
	SEAPAL Norte II	LAC Y AE/Zanja	19.14	18,471
	El Ahogado	LAC-Dn-P	39.82	17,731
	Agua Prieta	AE	102.11	60,457
EDO. MÉX	Lago de Texcoco I	LAC	12.10	
	Lechería	LAC	1.60	879
	Termoeléctrica Valle de México	LAC	8.11	
	Toluca Norte	FP + LAC	16.26	10,099
	Toluca Oriente	AE	13.52	13,002
MICH	Municipal No. 1	AE		
	Atapaneo	AE	12.03	5,949
	Los Itzicuaros	AE	2.22	1,905
	Uruapan	LAC		2,996
	Zitácuaro	AE		
MOR	Acapantzingo	LAC	2.33	2,978
	La Gachupina	LAC	1.30	1,640
NL	Noreste	AE	16.37	7,709
	Santa Rosa	AE	1.83	1,563
	Cadereyta	AE	3.03	1,673
	Norte	LAC-Dn	64.15	19,160
	Pemex San Rafael	LAC-Dn	19.96	8,846
	La Petaca	AE	2.94	2,040
	Dulces Nombres	LAC	136.95	67,230
	AIMSU	LAC	5.81	
Santiago	AE	0.72	1,358	
OAX	La Raya	AE	8.16	3,746
QRO	San Pedro Mártir	LAC-Dn	26.13	3,089
	San Pedro Ahuacatlán II	AE/Zanja	24.22	3,394

ESTADO	PTAR	PROCESO	Ton DBO/d	Consumo de EE (MWh/año)
Q ROO	Norte	FP + AE	5.12	3,861
	Caribe 2000	AE	4.93	2,364
	Pok-Ta-Pok	AE	3.18	2,129
	Gucumatz	AE	3.87	1,574
	Playa del Carmen II (Saastunja)	FP + AE	6.52	2,310
SLP	Tanque Tenorio	PA	11.93	6,518
SIN	Culiacán "Sur"	AE -Dn	9.65	4,857
	Norponiente	AE	4.98	2,747
	Uriás	AE	2.92	1,544
	El Crestón	FP + LAC	15.70	12,134
SON	Río Mayo	AE	15.89	2,349
	Los Alisos	AE	3.21	1,087
	Hermosillo	LAC		
TAMPS	Tierra Negra	AE	42.53	5,791
	Norponiente	AE	1.16	860
	Planta Internacional (S-O)	AE/Zanja	11.76	8,912
	PTAR Morelos	FP	2.02	849
	Victoria	AE/Zanja	2.62	1,623
VER	PTAR II	AE	3.79	3,259
	Xalapa	LAC	13.20	12,452
ZAC	Osiris	LAC	9.60	2,912

FP: Filtro percolador; LAC: Lodos activados convencional; AE: Aeración extendida; Dn: Denitrificación; RAFA: Reactor anaerobio de flujo ascendente; PA: Proceso anaerobio.

Se recopilará la información existente de los últimos tres años en relación a la calidad del agua del influente y del efluente, así como la de los lodos residuales que genera el proceso de tratamiento, para determinar el potencial de generación de biomasa y, por ende, del biogás a partir de los valores promedio del sistema de tratamiento. En algunas plantas de tratamiento se estabilizan de manera aerobia los lodos residuales, por lo que se estimará el ahorro energético al tratar los lodos de manera anaerobia para la recuperación de biogás.

2. Cálculo de del potencial de generación de energía eléctrica

Se calculará la cantidad teórica de biogás generado por los lodos residuales, y posteriormente se cuantificará el potencial de energía eléctrica que puede generar cada una de las PTARs, con ello se definirá el consumo (en kWh) que dejarían de consumir de la red eléctrica del país, y con esto se establecerá un ahorro energético. El procedimiento empleado se muestra en la Figura 1.

RESULTADOS

Para calcular la producción de energía se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Que el biogás contiene el 60% de metano.
- Que en función de las características del motor, la energía producida se repartirá en electricidad, calor y pérdidas.
- La eficiencia del motor para generar energía eléctrica es de 41%.

Se visitaron las 104 plantas, sin embargo, solo se obtuvo información de 93 PTARs. Estas representan 3.75% de las que existen en operación en México, y tratan 53,231 L/s, que es el 44.03% del total del agua residual tratada.

“Norteamérica y el Caribe en el camino hacia el desarrollo sostenible”

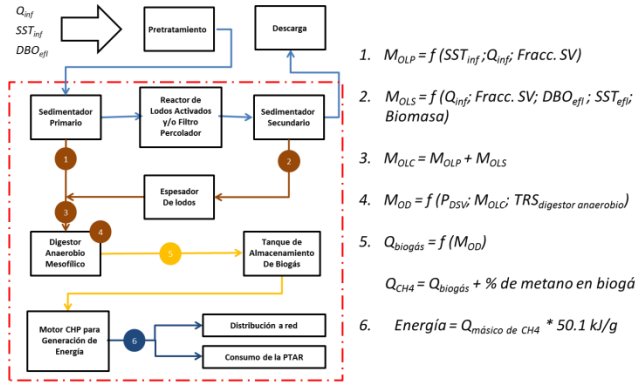


Figura 1. Diagrama del procedimiento para estimar la producción de energía eléctrica en una PTAR

De éstas, 49 son de aeración extendida (AE), 34 remueven materia orgánica y nitrifican, cinco eliminan materia orgánica y desnitrifican y las restantes 10 son en la modalidad de zanjas de oxidación que también eliminan nitrógeno. En total la modalidad de AE trata 22,573 L/s de agua residual. En la modalidad de lodos activados convencional 26 remueven materia orgánica y nitrifican y 10 eliminan materia orgánica y desnitrifican. Estas 36 PTARs tratan un flujo de 26,846 L/s. Por último, existen ocho plantas duales que en su proceso consideran el de lodos activados, éstas solo remueven materia orgánica y nitrifican. Su gasto de tratamiento es de 3,812 L/s.

A continuación, en la Tabla 3 se presentan los resultados de la posible producción de biogás, metano y energía eléctrica por planta.

Tabla 3. Estimación de producción de biogás y energía eléctrica por PTARs en México

ESTADO	PTAR	Biogás (m³/d)	Metano (m³/d)	Energía producida (MWh/año)
AGS	Cd. Aguascalientes	14,188	8,513	11,179.07
	Los Arellano	459	275	361.70
	Presa El Cedazo	1,329	797	1,046.82
	Jesús María	253	152	199.73
	Pabellón de Arteaga	614	368	483.64
	Rincón de Romos	605	363	476.89
BC	El Gallo	2,607	1,564	2,054.13
	El Naranjo	2,653	1,592	2,090.49
	Termoeléctrica Azteca (La Rosita)	554	333	436.86
	Ing. José Arturo Herrera Solís	1,113	668	876.96
	La Morita	805	483	633.96
BCS	Binacional O Pitar	17,064	10,239	13,445.37
	La Paz	9,760	5,856	7,690.23
COAH	La Paz	9,760	5,856	7,690.23
	Cd. Acuña	620	372	488.55
	PTAR 3 AHMSA	5,391	3,235	4,247.64
	Piedras Negras	1,515	909	1,193.55
COLIMA	Principal	14,209	8,525	11,195.72
	Colima-Villa de Álvarez	4,526	2,716	3,566.37
	Salagua	774	465	609.96
	Tecomán	297	178	233.98

ESTADO	PTAR	Biogás (m³/d)	Metano (m³/d)	Energía producida (MWh/año)
CHIAPAS	Tapachula Sur Oriente	583	350	459.72
CHIH	Chihuahua Norte	3,187	1,912	2,511.23
	Chihuahua Sur	12,427	7,456	9,791.67
	Planta Sur	3,622	2,173	2,853.57
	Planta Norte	1,575	945	1,241.03
	Nuevo Casas Grandes	820	492	646.40
CD MÉX	Santa Fe	486	291	382.72
	Coyoacán	1,391	834	1,095.70
	San Juan De Aragón	1,234	741	972.45
	Cd. Deportiva	888	533	699.40
	Cerro de la Estrella	21,102	12,661	16,626.39
	El Llano	891	535	702.03
	San Lorenzo	218	131	171.61
DGO	Durango Sur	746	448	588.15
	Cd. Lerdo	417	250	328.85
GTO	Principal (Planta Poniente)	1,990	1,194	1,568.04
	Irapuato II	1,529	917	1,204.68
	León (Planta Municipal)	17,775	10,843	14,238.59
	Pemex Salamanca	537	322	423.37
	Salamanca (Municipal)	1,897	1,138	1,494.54
	La Purísima	1,220	732	961.06
GRO	Aguas Blancas	2,210	1,326	1,741.05
	Renacimiento	602	361	474.27
	Club de Golf I	788	473	620.65
JAL	Lagos de Moreno	599	359	471.81
	SEAPAL Norte II	4,162	2,497	3,279.31
	El Ahogado	19,195	11,517	15,124.05
	Agua Prieta	13,102	7,861	10,323.66
EDO. MÉX	Lago de Texcoco I	6,260	3,756	4,932.49
	Lechería	651	390	512.72
	Termoeléctrica Valle de México	2,715	1,629	2,139.37
	Toluca Norte	8,732	5,239	6,880.02
MICH	Toluca Oriente	1,996	1,198	1,572.86
	Municipal No. 1	247	148	194.47
	Atapaneo	1,418	851	1,117.60
	Los Itzcuaros	363	218	285.66
	Uruapan	1,606	964	1,265.73
MOR	Zitácuaro	749	449	589.99
	Acapantzingo	1,005	603	791.47
NL	La Gachupina	552	331	435.28
	Noreste	1,600	960	1,260.39
	Santa Rosa	243	146	191.14
	Cadereyta	440	264	346.37
	Norte	29,924	17,955	23,578.24
	Pemex San Rafael	10,781	6,469	8,494.75
	La Petaca	350	210	275.85
	Dulces Nombres	68,398	41,039	53,892.40
	AIMSU	3,194	1,917	2,516.92
	Santiago	86	51	67.63

“Norteamérica y el Caribe en el camino hacia el desarrollo sostenible”

ESTADO	PTAR	Biogás (m ³ /d)	Metano (m ³ /d)	Energía producida (MWh/año)
OAX	La Raya	884	530	696.42
QRO	San Pedro Mártir	9,018	5,411	6,672.67
	San Pedro Ahuacatlán II	3,621	2,172	2,678.98
Q ROO	Norte	2,299	1,379	1,811.31
	Caribe 2000	1,803	1,082	1,420.70
	Pok-Ta-Pok	386	232	304.15
	Gucumatz	337	202	265.78
	Playa del Carmen II (Saastunja)	2,523	1,514	1,988.08
SLP	Tanque Tenorio	3,458	2,075	2,724.45
SIN	Culiacán “Sur”	1,153	692	908.76
	Norponiente	561	337	442.03
	Uriás	211	126	165.91
	El Crestón	3,569	2,142	2,812.31
SON	Río Mayo	1,715	1,029	1,351.58
	Los Alisos	373	224	294.07
	Hermosillo	32,175	19,305	25,351.53
TAMPS	Tierra Negra	4,615	2,769	3,636.10
	Norponiente	207	124	163.02
	Planta Internacional (S-O)	2,472	1,483	1,947.44
	PTAR Morelos	1,067	640	840.87
	Victoria	465	279	366.61
VER	PTAR II	517	310	407.69
	Xalapa	8,756	5,253	6,898.76
ZAC	Osiris	3,938	2,363	3,102.53

DISCUSIÓN

En la Tabla 4 se presenta un resumen por modalidad de lodos activados, en la que se establece la energía que puede ser producida por litro de agua residual tratada.

Tabla 4. Producción de energía por litro de agua residual

Proceso LA	Gasto (L/h)	Energía producida (kWh)	kW/L
AE	64,228	5,591	0.087
AE-Dn	5076	429	0.084
AE/Zanja	11960	1,328	0.111
LAC	51,871	16,652	0.321
LAC-Dn	44,774	10,636	0.238
Dual	13,723	3,180	0.232

Como se aprecia en la Tabla 4 las modalidades de AE y AE-Dn producen la menor energía por litro de agua residual tratada (0.087 y 0.084 kW/L). Sin embargo, el proceso de LAC genera alrededor de cuatro veces más energía (0.32 kW/L) que las modalidades de AE. Por otra parte, las modalidades de LAC-Dn y Dual se mantienen en un rango medio entre los procesos antes mencionados, con 0.23 kW/L.

Como se sabe la materia prima para la generación de biogás y posteriormente de energía eléctrica son los lodos, ya sean estos primarios y/o secundarios, y en esto radica la diferencia entre las modalidades de lodos activados, ya que, en la de LAC se tiene un lodo primario, que contiene una alta cantidad de materia orgánica, y uno secundario, constituido principalmente por microorganismos, a diferencia de que en el

de AE no se cuenta con lodos primarios y los secundarios salen del sistema parcialmente digeridos, debido a los tiempos de residencia hidráulicos, que en el reactor biológico son mayores a las 20 horas. Además, esto genera un menor volumen de lodo en relación con el de LAC.

Por lo que, en la modalidad de LAC se cuenta con una mayor carga orgánica en los lodos y un mayor volumen de los mismos, esto permite que se genere por litro de agua residual más energía que en cualquier otra modalidad de lodos activados.

Tabla 5. Porcentaje de reducción de consumo de energía por modalidad de lodos activados

Proceso LA	Consumo de energía (MWh/año)	Energía producida (MWh/año)	% de reducción de consumo de energía
AE	188,257	48,978	26.0
AE-Dn	48,675	11,629	23.9
AE/Zanja	20,247	3,756	18.5
LAC	133,838	145,874	100.0
LAC-Dn	110,279	89,889	81.5
Dual	44,005	28,696	65.2

En la Tabla 5, se muestra la cantidad de energía que se consume en un año por cada modalidad de lodos activados y también la posible cantidad de energía que puede producir a partir de los lodos en el mismo periodo de tiempo. Lo anterior permite establecer cuál es el porcentaje de reducción en el consumo de energía de la red convencional provista por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Así, se puede apreciar nuevamente que la modalidad de LAC puede cubrir su necesidad de energía al 100% y ceder un pequeño excedente (9%) hacia la red de la CFE. Sin embargo, la de AE solo puede reducir su consumo de energía en un rango de 18 a 26 %.

Si bien, la generación, de biogás y a su vez de la energía eléctrica, depende de la carga orgánica y volumen de lodo, también depende de la modalidad del proceso de tratamiento. Esto establece que las modalidades de LAC y LAC-Dn son adecuadas para cogenerar energía eléctrica, ya que se puede obtener más del 80% de los requerimientos de energía eléctrica, lo que lo hace económicamente viable.

Para los sistemas duales, se requiere efectuar con más detalle un análisis costo beneficio, para establecer la rentabilidad de poder instalar en estas modalidades un sistema de cogeneración de energía.

En el caso de las plantas que operan bajo la modalidad de AE no es viable la obtención de energía eléctrica, sin embargo, para aquellas que operen a un gasto cercano o superior al de diseño, es conveniente considerar una reingeniería para su conversión a modalidad convencional, lo que permitiría aumentar el gasto de operación, y a su vez obtener un mayor volumen de lodos residuales, haciendo que el sistema de tratamiento sea viable para la producción de energía eléctrica. Para tal efecto, se hace necesario determinar el posible costo-beneficio de esta reconversión, sin alterar la calidad del efluente.

En resumen, el proceso de lodos activados puede ser una fuente factible de producción de energía eléctrica alterna, de tal manera que puede cubrir sus requerimientos de demanda



“Norteamérica y el Caribe en el camino hacia el desarrollo sostenible”

de energía de operación en un rango del 20 al 100%, el cual depende a su vez del tipo de modalidad, siendo el convencional el más factible. Además, esto hace que el proceso de lodos activados sea sustentable en cuestiones energéticas y con costos de operación bajos.

CONCLUSIONES

1. Se obtuvo información de 93 plantas de lodos activados de las 104 planteadas en un inicio.
2. Las 93 PTARs evaluadas representan 3.75% de las que existen en operación en México, y tratan 53,231 L/s, que es el 44.03% del total del agua residual tratada.
3. Las modalidades de la PTARs de lodos activados son; 49 de aeración extendida que tratan 22,573 L/s de agua residual. En la modalidad de lodos activados convencional son 36 y tratan un flujo de 26,846 L/s. Existen ocho plantas duales que en su proceso consideran el de lodos activados y su gasto de tratamiento es de 3,812 L/s.
4. La producción del biogás, y por lo tanto de la energía eléctrica, depende directamente de la carga orgánica presente en los lodos y del tipo de proceso de lodos activados.
5. El proceso de lodos activados convencional genera alrededor de cuatro veces más energía (0.321 kW/L) que las modalidades de aeración extendida (0.087 kW/L).
6. Las modalidades de lodos activados convencional y de desnitrificación son adecuadas para cogenerar energía eléctrica, ya que se puede obtener más del 80% de sus requerimientos energéticos, lo que los hace económicamente viable.
7. El tratamiento de aguas residuales por el proceso de lodos activados puede ser sustentable en cuestiones energéticas y con costos de operación bajos, si se complementa con un de tratamiento de lodos anaerobio, para generación de biogás, que a su vez se pueda emplear para producir energía eléctrica.
8. La energía eléctrica proveniente de la combustión del biogás, producto del tratamiento de los lodos residuales, debe ser vista como una fuente de energía renovable y limpia, pues reduce la emisión de gases de efecto invernadero al disminuir el consumo de las fuentes convencionales de energía.

REFERENCIAS

1. Arceivala, S. (1998). *Wastewater Treatment for Pollution Control* (2° Ed ed.). New Dehli: McGraw-Hill.
2. Castro García-Mar, M. M.-G.-S.-B. (2012). Sostenibilidad energética de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales. II Jornadas inicio a la investigación de estudiantes de la facultad de Biología, (pp. 83-92). Murcia. España.
3. CAT, M. (2016, Octubre 27). Coordinador Comercial. (IMTA, Interviewer)
4. Comisión Nacional del Agua (2015) Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. México.
5. Chernicharo, V. S. (2005). *Biological wastewater treatment in warm climate regions*. London: IWA Publishing.
6. Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011). *Biogas from Waste and Renewable Resources*. Wiley-VCH.

7. Deublein, D., & Steinhauser, A. (n.d.). *Biogas from waste and renewable resources: An Introduction*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA.
8. Dresser-Rand. (2016, Agosto). Guascor de México. (IMTA, Interviewer)
9. Lagrange, B. (1979). *Biomethane. Principles, Techniques, Utilisation* (Vol. 2). Edisual / Energies.
10. Metcalf&Eddy. (2013). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5 Ed. ed.). New York: Mac Graw Hill.
11. Metcalf, & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4ta ed.). US: MacGrawHill.
12. NOM-004-SEMARNAT-2002. (n.d.). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México: Dirección General de Normas.
13. Prandota Trzcinski, A., Ganda, L., Soh, Y. A., Kunacheva, C., Dong Qing, Z., Leonard Lin, L., Jern Ng, W. (2016). Identification of recalcitrant compounds in a pilot-scale AB system: An adsorption (A) stage followed by a biological (B) stage to treat municipal wastewater. *Bioresource Technology*, 206, 121-127.
14. PTAR de León, G. (2016, Agosto). SAPAL. (IMTA, Interviewer)
15. PTAR de San Pedro Martir, Q. (2016, Julio). (IMTA, Interviewer)
16. Ries, T. (1993). Reduzierung der Schwefelwasserstoffbildung im Faulraum durch Zugabe von Eisenchlorid. *Schriftenreihe der Siedlungswasserwirtschaft Bochum*(25).
17. Speece, R. (1996). *Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters*. Nashville, TN: Archae Press.
18. U.S. EPA. (1979). *Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal*. US: Center for Environmental Research Information Technology Transfer.
19. U.S. EPA. (1995). *Case studies in residual use and energy conservation at wastewater treatment plants*. EPA 832-R-95-003. Washington: Environmental Protection Agency.
20. Varnero Moreno, P. M. (2011). *Manual de biogás. Manual, Gobierno de Chile, Ministerio de Energía, Santiago de Chile*.
21. WEF, ASCE, & EWRI. (2010). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants. Fifth Edition, Vol.3: Solids Processing and Management*. New York: Mac Graw Hill.
22. WEF, WERF, US EPA. (2012). *Solids Process Design and Management*. New York: McGrawHill.