Rev. Int. Contam. Ambient. *17* (1) 15-22, 2001

TRATAMIENTO DE LODOS ACEITOSOS RESIDUALES MEDIANTE PLASMA TÉRMICO EN AUSENCIA DE OXÍGENO

Gabriel CASTAÑEDA JIMÉNEZ[1], Joel PACHECO SOTELO[1]
Mabel VACA MIER[2], Julio FLORES RODRÍGUEZ[2] y Raymundo LÓPEZ CALLEJAS[2]

[1] Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Laboratorio de Aplicaciones de Plasmas Térmicos, Apdo. Postal 18-1027, C. P. 11801 D.F.
[2] Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Departamento de Energía, Av. San Pablo No. 180, Col. Reynosa-Tamaulipas, C.P. 02080. Tel. 5318-9579, Fax. 53189080, correo electrónico: mvm@correo.azc.uam.mx

(Recibido noviembre 1999, aceptado noviembre 2000)

Palabras clave: plasma térmico, residuos peligrosos, residuos aceitosos del petróleo

RESUMEN

En este trabajo se evaluó la aplicación del proceso de plasma térmico, operado en ausencia de oxígeno, para la degradación de lodos aceitosos residuales de la industria petroquímica, considerados como peligrosos de acuerdo con la normatividad ambiental vigente. El proceso se operó usando diferentes tiempos de residencia y se determinaron las características de los subproductos gaseosos y sólidos residuales. La eficiencia de degradación de materia orgánica fue del 99.99%. La reducción de volumen del residuo alcanzada en el mejor de los casos fue del 95.5%. El sólido residual está constituido por 50% de carbón y arcillas. Los gases residuales formados son de bajo peso molecular. Los residuos resultantes no son peligrosos y pueden ser dispuestos en terrenos.

Key words: thermal plasma, hazardous wastes, oily waste sludges

ABSTRACT

The thermal plasma process in absence of oxygen for the degradation of oily waste sludges was evaluated. These residues are commonly generated in the petrochemical industry and are considered hazardous wastes according to the present environmental regulations. The process was operated using different residence times and the characteristics of the gaseous by-products and residual soils were determined. The efficiency of organic matter degradation was 99.99 %. The attained volume reduction, under the best conditions was 95.5 %. The residual soils were composed of carbon and clays. The residual gases have low molecular weight. The resulting final wastes were non-hazardous and could be disposed of in landfills.

INTRODUCCIÓN

Los lodos aceitosos generados en la refinación del petróleo provienen de diferentes procesos como la remoción de sólidos y aceites de las aguas residuales, el almacenamiento del petróleo crudo y sus productos, la destilación y los procesos de filtración. El tratamiento y la disposición de estos lodos representan un problema potencial de gran magnitud debido a que el petróleo es una de las principales fuentes de energía del mundo y su procesamiento produce grandes cantidades de residuos. Por cada 492 toneladas de crudo procesado resulta aproximadamente una tonelada de lodos aceitosos lo que significa un 0.2%. (Cooper y Cricchi 1993). En México la generación de tales residuos se estima en 400,000 toneladas por año.

Los lodos aceitosos son peligrosos debido a que pueden contener: metales pesados (arsénico, bario, cadmio, cromo, plomo, mercurio, selenio y plata), compuestos persistentes (bifenilos policlorados, hidrocarburos halogenados y dioxinas) y compuestos inorgánicos tóxicos (amoniaco y ácido sulfhídrico) (Burton y Ravishankar 1989). En la normatividad mexicana estos lodos se encuentran listados dentro de la clasificación de residuos peligrosos por giro industrial y proceso (INE 1993a). Los diferentes métodos de tratamiento y disposición usados actualmente presentan grandes inconvenientes ambientales y económicos por lo que es importante la búsqueda de tecnologías alternas que den respuesta a sus limitaciones. Aquí se propone el plasma térmico como una opción de tratamiento con diversas ventajas.

El plasma térmico es un gas muy ionizado que contiene cantidades equivalentes de partículas con carga positiva y negativa. Se genera en una antorcha que alcanza temperaturas de 5,000 a 15,000 °C en el centro de la pluma de plasma y se produce por una descarga eléctrica a través de un flujo de gas (Ar, H_2, O_2 ó combinaciones de ellos) (**figure 1**). El gas ionizado es usado como vehículo de energía en forma de calor, el proceso consiste en inyectar el residuo en el plasma dentro de un reactor sellado y ahí será disociado en sus elementos constitutivos debido a que los enlaces que son destruidos mantienen unidas a las moléculas. Estos elementos se recombinan para formar compuestos de bajo peso molecular como CO_2, H_2O, N_2, H_2, HCl y CO. Los gases, al salir del reactor son conducidos hacia un intercambiador de calor, posteriormente a equipos de control de emisiones atmosféricas y finalmente salen a la atmósfera (Cota 1998). Las ventajas que ofrece son: eficiencias de degradación de compuestos orgánicos cercanas al 100 %, producción de muy bajas cantidades de subproductos de combustión incompleta y de gases, la escoria que resulta cuando se tratan residuos con alto contenido de materiales inorgánicos es un vitrificado con características no lixiviables, el tamaño de una planta es relativamente pequeño debido a que el proceso no depende del tiempo de residencia ni del oxígeno adicional para asegurar la combustión, la energía del plasma se transfiere directamente al material a tratar (Bellandir 1995).

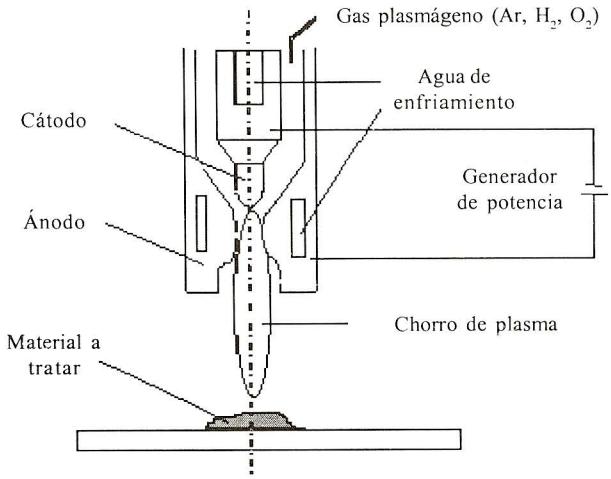

Fig. 1. Antorcha de plasma (Adaptada de Roth 1995)

En este trabajo se evaluó la factibilidad de aplicación del proceso de plasma térmico en la degradación de lodos aceitosos residuales de la extracción y del procesamiento del petróleo, operado con argón en condiciones de ausencia de oxígeno. Se investigó la eficiencia del proceso en términos de la destrucción del lodo y de la calidad y cantidad de los productos residuales sólidos y gaseosos del proceso.

MATERIALES Y MÉTODOS

La muestra de lodo aceitoso se obtuvo de los centros de acopio de Petróleos Mexicanos (PEMEX). Se trabajó con la original y la libre de sedimentos por filtración con tela.

Se determinaron los siguientes parámetros fisicoquímicos: grasas y aceites, por el método de extracción soxhlet para lodos; sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV) y humedad, utilizando métodos gravimétricos (APHA 1992). Se llevó a cabo el análisis elemental de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y oxígeno (O), empleando el método IMP-QA208, mediante el equipo Varian EL Elemental (IMP 1997). El análisis de azufre se realizó por el método IMP-QA207 con equipo Leco modelo CR-12, usando oxígeno puro como oxidante (IMP 1997). Los metales totales (Pb, As, Ni, Al, Ag, Hg, Cu, Zn, Cd, Cr y Ba), así como los lixiviables (Pb, As, Ni, Hg, Cd, Cr) se determinaron por el método de espectrometría de absorción atómica con un equipo Varian Espectra AA-200. Las muestras del

lodo se pretrataron mediante digestión ácida. Los metales lixiviables se extrajeron por el método descrito en la Norma Oficial Mexicana NOM-Ecol-053-1993 (INE 1993b).

Para el análisis de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) mediante cromatografía de gases se utilizó un equipo Varian modelo 3300 con una columna megaboro DB1 (30 m x 1 mm), con película de 0.5 μm y detector de ionización de flama. El análisis se llevó a cabo de acuerdo con el método 8015-EPA (EPA 1999).

El equipo experimental para la degradación de residuos está integrado por los siguientes componentes: un generador de potencia regulable de 0 a 10 kW; un cañón de plasma térmico no transferido de dos cilindros concéntricos de cobre electrolítico, con un cilindro de tungsteno incrustado en la punta; el reactor de pirólisis, donde se lleva a cabo la degradación así como la recombinación de las especies atomizadas, es una cámara de acero inoxidable de 34.8 cm de altura y 28.8 cm de diámetro; un intercambiador de calor tipo coraza y tubos a contracorriente con 6 L/min de agua para enfriar los gases provenientes del reactor; un equipo analizador de gases con espectrómetro de masas MKS, modelo PPT 300 EM con sensor cuadrupolo PPT analizador de gs residual, para registro de 300 UMA (unidades de masa atómica) y programa PPTView; un analizador de gases Sensonic 2000, para CO_2, CO, O_2, NO_x y SO_2 y una torre de absorción de gases.

El proceso consiste en inyectar el residuo directamente en el chorro de plasma de argón (en ausencia de oxígeno), que se encuentra dentro de un reactor perfectamente sellado, con una salida para la evacuación de los gases. Las partículas suspendidas en los gases se capturan en un filtro de tela para su posterior análisis. Los gases fluyen hacia un intercambiador de calor donde su temperatura es llevada al intervalo de 90 a 100 °C y después pasan por un lavador de gases que opera con una solución de NaOH al 3% en masa, para absorber gases tóxicos como HCl y finalmente los gases salen a la atmósfera. En la **figura 2** se presenta un diagrama de flujo del proceso de plasma térmico empleado para las pruebas experimentales de degradación.

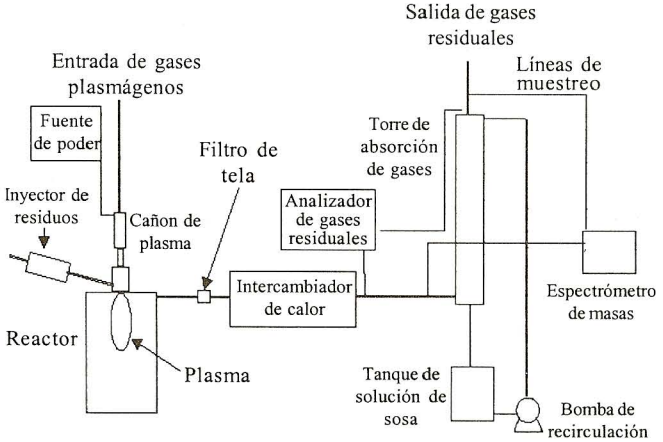

Fig. 2. Diagrama del proceso de plasma térmico

Los subproductos generados en el proceso como la escoria y el polvo capturados en el filtro se analizaron por microscopía electrónica de barrido con un equipo XL30 Philips y un detector Edax CDU™ LEAP™ y por difractometría de rayos X, con un difractómetro Siemens modelo D5000.

Se realizaron tres corridas experimentales de degradación con el lodo original y dos con el lodo filtrado. Se utilizaron las condiciones de operación resumidas en la **tabla I** Se hicieron pruebas con diferentes flujos de inyección, suponiendo que se disminuye la formación de sub productos gaseosos para tiempos menores de residencia en el reactor.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la **tabla II** se presentan los resultados de los análisis de metales de los lodos, tanto de la muestra original como de la filtrada.

Se puede apreciar que la mayoría de los metales se encuentran en la fase líquida del lodo puesto que se tiene aproximadamente la misma cantidad de metales en el

TABLA I. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LAS PRUEBAS (POTENCIA: 3 kW, FLUJO DE Ar: 20 L/min)

Prueba	Volumen de muestra (mL)	Cantidad de muestra (g)	Tiempo de corrida (min)	Flujo de inyección de lodo (g/min)	Flujo de inyección de lodo (mL/min)
			Lodo original		
1	55	47.13	1.99	24.6	28.7
2	55	47.13	3.43	13.7	16.0
3	35	30.00	2.51	11.9	13.9
			Lodo filtrado		
4	38	32.56	2.66	12.2	14.2
5	55	42.85	11.00	3.9	5.0

TABLA II. METALES TOTALES EN EL LODO ORIGINAL Y FILTRADO

Metal	Concentración (mg/kg) Lodo original	σ	Lodo filtrado	σ
Ag	51.70	5.53	12.38	6.59
Al	4326.34	1.25	589.95	6.97
Ba	258.25	6.55	78.92	5.28
Cd	17.77	11.93	0.29	51.28
Cr	28.26	5.10	0.79	38.78
Cu	80.82	4.61	20.85	21.04
Hg	0.00	-	0.00	-
Ni	94.45	8.84	24.93	1.63
Pb	144.45	5.56	50.22	9.23
Zn	624.32	4.40	117.91	5.30

lodo original y en el lodo filtrado. Sin embargo, los metales Ni, Zn, Al y Ba se concentran en gran parte en el sedimento del residuo, ya que en el lodo filtrado los metales en comparación con el original.

Los lodos original y filtrado contienen cantidades similares de metales lixiviables (**Tabla III**). Es importante notar que la concentración de metales lixiviables de los lodos sin tratar, de acuerdo con la prueba de extracción, es muy reducida, por lo que los lodos en cuestión no son peligrosos por toxicidad de metales (INE 1993b). Sin embargo, las grandes cantidades de metales que se detectaron en las pruebas de metales totales (**Tabla I**) son de importancia porque se sabe que el proceso de plasma no destruye los metales, de hecho ocurre su concentración en el residuo final del proceso, como se discutirá posteriormente.

En la **tabla IV** se muestran los resultados de los análisis físicos aplicados a los dos lodos. El alto contenido de hidrocarburos, que se refleja en la cantidad total de grasas y aceites de un residuo, favorece la degradación en el proceso de plasma térmico. Los lodos estudiados mostraron un contenido relativamente bajo de grasas, ya que el valor típico para estos residuos es de 48% (Pushkarev *et al.* 1983). El contenido de grasas y aceites en el lodo filtrado fue superior al del lodo original, esto significa que una porción importante de grasas está en la fase líquida del lodo, así se espera una degradación mayor en las pruebas con el lodo filtrado.

En cuanto a los sólidos totales en el lodo original los niveles son relativamente normales, pues se ha reportado un valor típico de 58% (Burton y Ravishankar 1989). En la literatura aparece un valor típico de sólidos inertes del 13 % (Pushkarev *et al.* 1983), en el lodo original, 10.69 % y en el lodo filtrado 6.55 %, que se encuentran en un intervalo aceptable. Con estos resultados se podría anticipar que en las pruebas de degradación el residuo sólido será por lo menos de 10 % pues el material inerte no se gasifica debido a sus características químicas (como el alto contenido de silicio). En cuanto al contenido de humedad se obtuvo 50.39% y 69.11% para el lodo original y el lodo filtrado, respectivamente, estando el valor típico descrito alrededor de 50%.

Del análisis elemental que aparece en la **tabla V**, por la presencia de N y S, se puede esperar que en las pruebas de degradación se formen gases tóxicos como NO_x y SO_2. Por otro lado, con los nucleos altos de carbón (20 %), se puede predecir un alto contenido de este elemento en los subproductos provenientes de la degradación, que pueden evidenciarse en forma de CO, CO_2 ó bien C en forma de polvo. También es notable que el mayor porcentaje en masa corresponde al oxígeno, lo que explica la formación abundante de CO_2 sin la adición de oxígeno al proceso.

Tratamiento de las muestras con el proceso de plasma térmico

En la **figura 3** se han graficado los porcentajes de los productos del proceso de las diferentes corridas. Se obtuvo un residuo sólido que en su mayor proporción (co-

TABLA III. METALES LIXIVIABLES DE LOS LODOS Y LÍMITES DE PELIGROSIDAD DE LA NORMA NOM-ECOL-053-1993

Metal	Lixiviado del lodo original (mg/L)	Lixiviado del lodo filtrado (mg/L)	Concentración máxima permitida en el lixiviado (INE 1993b) (mg/L)
Ag	0.31	0.30	5.00
Al	0.40	0.00	-
Ba	4.80	0.00	100.00
Cd	0.14	0.10	1.00
Cr^{+6}	0.22	0.19	5.00
Cu	0.12	0.12	-
Hg	0.00	0.00	0.2
Ni	0.20	0.00	5.0
Pb	1.47	1.20	5.0
Zn	5.86	0.19	-

TABLA IV. ANÁLISIS DE PARÁMETROS FÍSICOS DE LOS LODOS

Parámetro	Lodo original	σ	Lodo filtrado	σ
ST (% masa)	49.61	2.91	30.89	3.11
STV (% masa)	44.30	3.77	26.56	2.93
Humedad (% masa)	50.39	1.25	69.11	2.05
Grasas y aceites (% masa)	25.26	0.32	33.33	0.74
Densidad (g/mL)	0.875	0.037	0.830	0.044

rrespondiente al intervalo entre 4 y 20 % de la masa original de lodo) quedó depositado en el reactor y en cantidad mínima (0.5% aproximadamente) se capturó en los filtros de tela. Ambos polvos ofrecían la misma apariencia física, color café oscuro y consistencia fina y también presentaron la misma composición elemental según los resultados que se muestran en la **tabla VI** El residuo sólido obtenido en las pruebas con el lodo filtrado fue un polvo fino de color negro. Es importante notar que se obtuvo muy poco residuo sólido en las pruebas con el lodo filtrado, tal y como se tenía previsto, ya que la filtración previa del lodo eliminó el material arcilloso. En las pruebas con lodo original se observó que a mayor flujo de inyección se hubo mayor cantidad de sólido, por ejemplo, para un mismo volumen de muestra de 55 mL (corridas 1y 2) se obtiene

TABLA V. ANÁLISIS ELEMENTAL DE LOS LODOS. TODOS LOS RESULTADOS FUERON OBTENIDOS EN BASE HÚMEDA

Elemento	Lodo original (% masa, promedio)	σ	Lodo filtrado (% masa, promedio)	σ
C	18.4	1.9	23.3	3.2
H	10.5	0.4	11.3	3.1
O	70.0	3.8	69.3	2.5
N	0.3	0.0	0.2	0.0
S	0.3	0.0	0.1	0.0

7.8% más de residuo sólido expresado como masa de C con 72% de incremento en el tiempo de residencia.

Se recuperó carbón aunque no en una cantidad importante. El contenido de C en los subproductos sólidos fue de 46 % con el lodo filtrado y 24 % con el lodo sin filtrar. Los resultados de los análisis cualitativos por difractometría de rayos X mostraron que los compuestos que se encuentran en mayor abundancia, tanto en la escoria como en el polvo capturado en los filtros, provenientes de la degradación del lodo original son: albita ($Na\ Al\ Si_3\ O_8$), carbonato de calcio ($CaCO_3$), ferroactinolita ($2\ Fe_5\ Si\ 8O_{22}\ (OH)_2$), cuarzo ($SiO_2$), potasio, sodio, calcio y aluminio, además de una gran cantidad de material amorfo. El elemento más abundante en la escoria después del carbón y del oxígeno es el silicio (19.51%), seguido de otros elementos como: Fe, Mn, K, Mg y Ca. Tales elementos son componentes básicos del suelo, por eso se encuentran en grandes cantidades, asociados a la arcilla, detectada en cantidades importantes en los lodos.

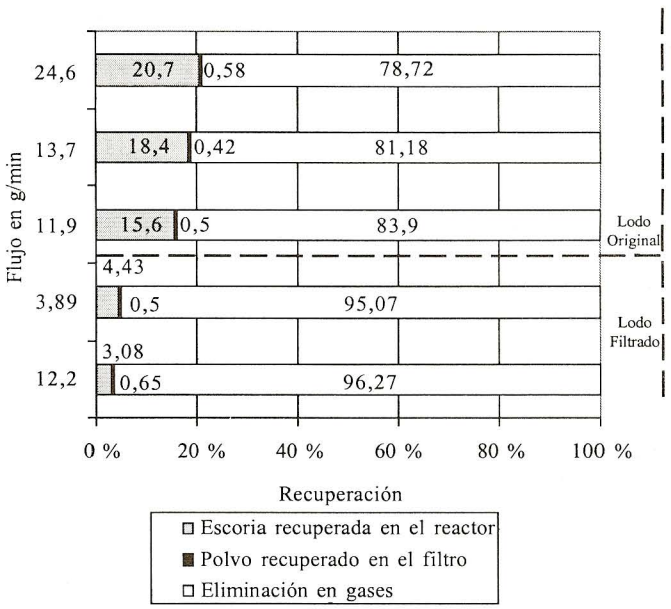

Fig. 3. Cantidades de escoria y polvo producidas en el proceso

Resultados de los análisis de metales en la escoria y en el polvo

Los análisis de metales del subproducto sólido (escoria del reactor) y del polvo capturado en los filtros se muestran en la **tabla VII**. Las concentraciones de metales detectadas en los polvos residuales son superiores a las de los lodos que aparecen en la **tabla 1**, debido a la reducción de volumen que se dió en el proceso. La concentración elevada de cobre en el residuo sólido se puede explicar por el desgaste de los electrodos, que están fabricados con dicho elemento. A pesar de que los metales pesados están en grandes concentraciones en los polvos residuales, no fueron encontrados en los lixiviados de la prueba de extracción aplicada a estos polvos (**Tabla VIII**), esto es, no presentan características de peligrosidad conforme a los límites señalados por la norma vigente (INE 1993a).

TABLA VI. ANÁLISIS DE MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DE LA ESCORIA Y DEL POLVO DE FILTRO PROVENIENTES DE LA DEGRADACIÓN DE LOS LODOS

Elemento	Lodo original		Lodo filtrado	
	% peso en escoria	% peso en polvo de filtro	% peso en escoria	% peso en polvo del filtro
Al	5.20	4.85	5.43	4.98
C	23.44	25.76	46.62	47.98
Ca	3.71	3.08	3.14	2.05
Cl	n. d.	n. d.	0.87	0.76
Cu	n. d.	n. d.	0.96	1.09
K	1.50	1.77	n. d.	n. d.
Mg	4.24	3.76	n. d.	n. d.
Mn	0.67	0.68	n. d.	n. d.
Na	1.98	1.32	n. d.	n. d.
O	27.89	25.78	20.92	21.89
S	2.42	3.84	0.46	0.67
Si	19.51	19.73	n. d.	n. d.
Ti	0.39	0.46	n. d.	n. d.

n.d.: no detectado dentro de los límites del equipo

De esta manera se observó que el proceso mantuvo la inmovilidad de los metales y es muy probable que haya promovido su encapsulamiento por vitrificación, y de aquí se deriva una de sus ventajas ambientales (Staley 1990).

Se puede afirmar que el proceso de plasma térmico es muy eficiente para la degradación de lodos aceitosos, ya que se redujo el volumen de tales residuos hasta un 16 % y un 5 % para los dos tipos de muestras tratadas y además estos residuos quedaron con características inertes, por lo cual pueden ser dispuestos en el suelo sin riesgo o peligrosidad. Por otro lado, considerando que la mayor parte del subproducto sólido está compuesto por albita (material inorgánico) entonces tal residuo podría ser reutilizado como soporte de capas asfálticas.

TABLA VII. ANÁLISIS POR ABSORCIÓN ATÓMICA DE METALES DE LA ESCORIA PROVENIENTES DE AMBOS LODOS

Metal	Concentración (mg/kg lodo original)	Concentración (mg/kg lodo filtrado)
Ag	51.46	49.99
Al	156090.00	21285.00
Ba	67298.64	205.87
Cd	30.80	21.46
Cr	131.00	115.56
Cu	2054.44	2006.14
Hg	0.00	1.71
Ni	65994.49	202.63
Pb	142.72	116.50
Zn	15002.24	501.02

Análisis de gases residuales

En la **figura 4** se muestran los resultados de los análisis de gases residuales. Las concentraciones de CO que se detectaron son muy altas, lo cual obedece a que el proceso fue operado en ausencia de oxígeno y de esta manera no es posible que se lleve a cabo una combustión completa del carbono orgánico hasta CO_2. El oxígeno que se detectó tanto en forma de CO como CO_2 y O_2 es el que contiene el mismo lodo (alrededor del 67%).

Así, a través de los espectros de masa, no se detectaron moléculas orgánicas pesadas, sólo se observaron los picos correspondientes a gases como: agua, argón, bióxido y monóxido de carbono y oxígeno, lo que indica que la degradación de la materia orgánica es completa.

Es importante que se considere la instalación de un equipo lavador de gases para controlar las emisiones de CO. También el SO_2 se encuentra en concentraciones altas puesto que rebasa los límites marcados por la normatividad mexicana vigente (DOF 1997). La torre de absorción de gases funcionó con una eficiencia de 50.33 % en la separación del CO, aunque se observó un 100% de eficiencia para la absorción del SO_2.

Eficiencia de degradación del proceso

El cálculo de la eficiencia de degradación se hizo con base en la determinación de hidrocarburos totales del petróleo tanto del lodo como de la escoria (residuos sólidos). Los resultados se resumen en la **tabla IX**. En ambos casos la eficiencia de degradación del material orgánico fue superior al 99.99%.

CONCLUSIONES

El proceso de plasma térmico fue muy eficiente para

TABLA VIII. ANÁLISIS CON PLASMA Y LÍMITES DE PELIGROSIDAD DE METALES PESADOS LIXIVIABLES DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DE LA DEGRADACIÓN

Metal	Lixiviado del polvo de la degradación del lodo original (mg/L)	Lixiviado del polvo de la degradación del lodo filtrado (mg/L)	Concentración máxima permitida en el lixiviado (mg/L) (INE, 1993a)
Ag	0.33	0.13	5.0
Cd	0.03	0.02	1.0
Cr^{+6}	0.59	0.14	5.0
Ni	0.53	0.15	5.0
Pb	0.00	0.00	5.0

la degradación de lodos aceitosos. El volumen final resultó sólo 16 % y 15 % del volumen original de los dos tipos de muestras tratadas y con características inertes, por lo cual pueden ser dispuestos en el suelo sin riesgo alguno de peligrosidad al ambiente o a la salud. Considerando que la mayor parte del subproducto sólido generado en el proceso está compuesto por material inorgánico, entonces podría ser reciclado, como materia prima para el soporte de capa asfáltica, por ejemplo

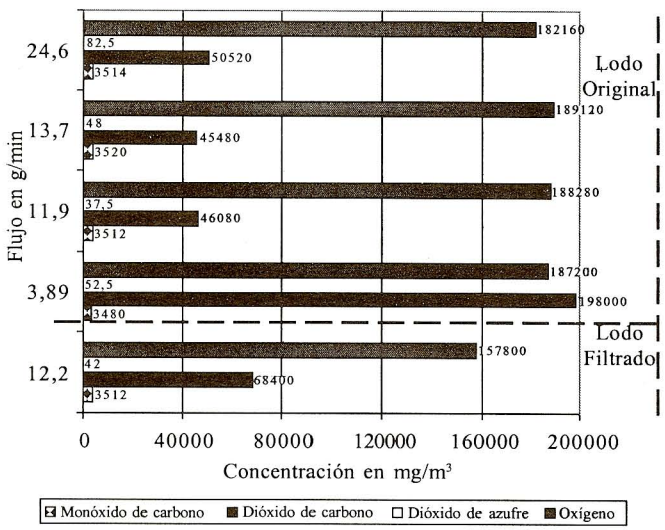

Fig. 4. Residuos del proceso de degradación

La eficiencia de degradación calculada con respecto a la reducción de hidrocarburos totales del petróleo fue casi del 100%. En los gases residuales sólo se detectaron moléculas de bajo peso molecular como agua, argón, bióxido y monóxido de carbono y oxígeno. Los metales de los sólidos residuales no son lixiviables y por lo tanto tampoco ofrecen peligrosidad, y así los residuos pueden disponerse en suelos sin riesgos ambientales.

Es importante que se considere la instalación de un equipo lavador de gases para controlar las emisiones de gases tóxicos que se generan durante el proceso.

TABLA IX. EFICIENCIA DE DEGRADACIÓN DEL PROCESO

	HTP (mg/L)	HTP final (mg/L)	η (%)
Lodo original	55,170.4	3.01	99.994
Lodo filtrado	17,333.6	1.04	99.994

REFERENCIAS

APHA (1992). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association (A. E. Grenberg, L. S. Clesceri y A. D. Eaton, Eds.) Nueva York.

Bellandir R. (1995). *Innovative engineering technologies for hazardous waste remediation*, O'Brien & Gere Engineers, Inc., Van Nostrand Reinhold, Nueva York.

Burton D. J. y Ravishankar K. (1989). *Treatment of hazardous petrochemical and petroleum wastes*. Noyes Publications, Park Ridge, N. J.

Cooper G.R. y Cricchi G. (1995). *Oil refinery waste disposal methods, quantities and costs*. 1993 Survey, CONCAWE, Bruelas.

Cota G. (1998). Estudio de degradación de residuos peligrosos. Tesis de maestría, UNAM, México.

DOF (1997). Anteproyecto de norma oficial mexicana NOM-63-Ecol/1995, que regula las instalaciones destinadas al tratamiento térmico de materiales y residuos provenientes de cualquier actividad y sus emisiones al ambiente. Diario Oficial de la Federación.

EPA (1999). Internet, http://yosemite.epa.gov/.

IMP (1997). Carbono y azufre totales en muestras de catalizadores (IMP-QA-207). Laboratorio Central del IMP, Instituto Mexicano del Petróleo.

INE (1993a). Norma Oficial Mexicana NOM-052-Ecol-1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Diario Oficial de la Federación, 22 de octubre.

INE (1993b). Norma Oficial Mexicana NOM-053-Ecol-1993, que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de

extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Diario Oficial de la Federación, 22 de octubre.

Pushkarev V.V., Yuzhaninov A. G.y Men S. K. (1983). *Treatment of oil-containing wastewater*. Allerton Press, Inc. Nueva York.

Roth J. R.(1995). *Principles, industrial plasma engineering*. Vol. 1. Institute of Physics Publishing, Bristol, Filadelfia.

Ramasamy V., Li T., Saito K., Cremers C. J. y Majidi V. (1996) Combustion by-products destruction by arc plasma, Hazardous Waste Hazardous Materials *13*, 134-141.