

ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE AZUFRE EN PRODUCTOS, EMISIONES DE SO_x Y LA RECUPERACIÓN DEL MISMO EN EL SISTEMA NACIONAL DE REFINACIÓN

Fabiola Selene ALCÁNTAR GONZÁLEZ¹ y M. Javier CRUZ GÓMEZ²

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Universidad No. 3000 México, D.F. C.P.0415. ¹ Teléfono (5255) 5622 5358. Correo electrónico: faby_sel@yahoo.com.mx ² Teléfono (5255) 5622 5359. Correo electrónico: mjcg@servidor.unam.mx

(Recibido agosto 2009, aceptado abril 2011)

Palabras clave: azufre, emisiones de SO_x , gasolina, diesel y balance de materia

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo fue identificar la distribución de azufre (S) en el Sistema Nacional de Refinación (SNR) mediante la realización de un balance de materia del azufre con los datos proporcionados por la solicitud número 1857600066308 requerido a Pemex Refinación mediante el Instituto Federal de Acceso a la Información (IFAI) para determinar el cumplimiento de la NOM-148-SEMARNAT-2006 "Contaminación atmosférica. Recuperación de azufre proveniente de los procesos de refinación de petróleo" y la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 "Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental" y determinar si las emisiones de SO_x están disminuyendo al introducir los combustibles con bajo contenido de azufre. Este balance se llevó a cabo en cada una de las refinerías de México como son: Cadereyta, Madero, Minatitlán, Salamanca, Salina Cruz y Tula. En el balance se determinó: el azufre total en crudo y otros insumos (S_T), azufre en productos (S_P), azufre a quemadores y oxidadores (S_Q) y azufre recuperado (S_R); de acuerdo a los lineamientos de la NOM-148-SEMARNAT-2006. Al realizar el balance, los resultados globales obtenidos para el SNR durante el 2008 fueron: 1 444 000 toneladas de azufre a la entrada; 386 000 toneladas azufre recuperado mediante el proceso Claus, 980 000 toneladas de azufre en productos elaborados en el SNR y 78 000 toneladas de azufre enviados a quemadores y oxidadores térmicos, de los cuales se emitieron 291 586 ton SO_x /año. De acuerdo al análisis de recuperación de azufre en las plantas Claus del SNR se obtuvieron en el 2008 los siguientes resultados: solo las refinerías de Cadereyta, Madero y Tula cumplen con el 90 % de recuperación de azufre tal como lo indica la NOM-148-SEMARNAT-2006, debido a la capacidad de las plantas recuperadoras de azufre con la que cuentan. Por lo tanto para que las demás refinerías puedan cumplir con la norma anterior, es necesario aumentar la capacidad de sus plantas recuperadoras de azufre.

Key words: sulphur, SO_x emissions, gasoline, diesel and material balance

ABSTRACT

The main objective of this study was to identify the distribution of sulphur (S) in the Mexican Refinery National System (SNR) by performing a sulphur material balance with the data provided as an answer to the application number 1857600066308, made

to the Instituto Federal de Acceso a la Información (IFAI) which provided monthly data from each refinery to determine the compliance to the NOM-148-SEMARNAT-2006 and NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005. It was also determined if the SO_x 's emissions to the atmosphere are decreasing as a result of the introduction of low sulphur gasolines and diesel. The material balance was carried out for each Mexican refinery: Cadereyta, Madero, Minatitlan, Salamanca, Salina Cruz and Tula. To perform the balance, it was determined the total sulphur in crude oil and other inputs (S_T), sulphur in products (S_P), sulphur to burners and thermal oxidizers (S_Q) and recovered sulphur (S_R); based on the NOM-148-SEMARNAT-2006. The overall result for the SNR 2008 year indicates: total amount of sulphur that entered was 1 444 000 tons of sulphur. The amount of recovered sulphur through the Claus process was 386 000 sulphur tons, 980 000 sulphur tons in products manufactured in the SNR and 78 000 sulphur tons to burners and thermal oxidizer, which 291 586 Tons SO_x by year. The analysis of the Claus sulphur recovery plants from the SNR showed the following results in 2008. Cadereyta, Madero and Tula refineries have enough capacity, since they are recovering 90 % of the sulphur as requested by the NOM-148-SEMARNAT-2006. According to this, the other refineries need to increase their sulphur plants recovery capacity to comply the above NOM.

INTRODUCCIÓN

Con respecto al crudo que se ofrece en todo el mundo se sabe que el contenido promedio de azufre es de 100 a 33 000 ppm (Fredriksson 2000); sin embargo, las refinerías de México están construidas para procesar tres variedades de petróleo crudo con diferentes cantidades de azufre como son crudo Maya cuyo contenido es de 3.3 % en peso de azufre, crudo Istmo con 1.3 % en peso de azufre y crudo Olmeca con 0.8 % en peso de azufre (PEMEX 2010a).

La principal razón y motivo por el cual se desea recuperar el azufre del crudo procesado es la protección al ambiente, debido a que el azufre cuando se quema se transforma en bióxido de azufre (SO_2) este se libera a la atmósfera donde tiene efectos tóxicos (Gary 2001) y de deterioro para el ambiente.

En México, el 15 de abril de 2004, Pemex introdujo al mercado la gasolina Pemex Premium, con un contenido de azufre de 250 ppm promedio/300 ppm máximo en las zonas metropolitanas del país, de 92 octanos, la cual reduciría un 40 % las emisiones de contaminantes a la atmósfera y mejoraría el rendimiento de los automotores. Por otra parte el 11 de enero de 2006 se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 "Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental" cuyo objetivo fue reducir el contenido de azufre de los combustibles (SEMARNAT 2006).

De acuerdo a esta norma el contenido de azufre de la gasolina Pemex Premium se redujo de 250 ppm promedio/300 ppm máximo a 30 ppm promedio/80

ppm máximo a partir de octubre de 2006. Mientras para la gasolina Pemex Magna se redujo de 300 ppm promedio/ 500 ppm máxima a Pemex Magna UBA (Ultra Bajo Azufre) con 30 ppm promedio/ 80 ppm máximo a partir de octubre de 2006 en las zonas metropolitanas como son la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), Guadalajara (ZMG) y Monterrey (ZMM); mientras para el resto del país se obtendría a partir de enero de 2009 la gasolina Pemex Magna de 30 ppm promedio/ 80 ppm máximo.

En el diesel se redujo el contenido de 500 ppm máximo a diesel UBA con 15 ppm a partir de enero de 2007 en la Zona Fronteriza Norte formada por Zona Noroeste y Pacífico Z4 (Cd. Obregón, Ensenada, Hermosillo, Magdalena, Mexicali, Nogales, Rosarito y a la Terminal de Almacenamiento y Distribución de Ciudad Madero). Mientras que para la ZMVM, ZMG y ZMM se realizó la reducción de azufre a 15 ppm en el diesel a partir de enero de 2009 y a partir de septiembre de 2009 en el resto del país (SEMARNAT 2006).

Para que Pemex Refinación (PREF) cumpliera con la NOM-086 se consideró el proyecto de Calidad de Combustibles, éste llevará a cabo las siguientes modificaciones en el esquema de procesamiento del SNR en equipos e instalaciones de plantas (PEMEX, 2010b).

El alcance del proyecto considera para gasolinas el desarrollo de ingeniería, la procura, construcción, pruebas y puestas en marcha de plantas desulfuradoras de gasolina catalítica, unidades regeneradoras y de amina, purificadoras de hidrógeno cuyo propósito es suministrar este gas al postratamiento de gasolinas

catalíticas, sistemas complementarios, servicios auxiliares y su integración a las refinerías. El proyecto se dividió en tres paquetes de obra, el primero considera a las refinerías de Tula y Salamanca, el segundo a Madero y Cadereyta, y el tercero a Minatitlán y Salina Cruz.

Para obtener el diesel con bajo contenido de azufre (UBA) se considera la construcción y modernización tanto de hidrodesulfuradoras como de plantas complementarias (generadoras de hidrógeno, purificadoras de hidrógeno, recuperación de azufre, tratadoras de aguas amargas y de regeneración de aminas), así como unidades de servicios auxiliares nuevas (calderas de vapor y turbogeneradores), ampliaciones y adecuaciones en unidades de servicios auxiliares, infraestructura de almacenamiento, sistemas de mezclado e integración. En 2009 concluyó la ingeniería básica y conceptual de Cadereyta mientras que en las otras refinerías estaba en ejecución el licenciamiento de tecnologías (PEMEX 2010b).

Las tres principales vertientes de este proyecto están integradas por gasolina, diesel y servicios auxiliares. Para la gasolina se considera la construcción de 11 plantas de postratamiento y como servicios auxiliares se considera la construcción de siete plantas secundarias asociadas al proyecto, entre las que se encuentran 4 plantas de hidrogenación, 3 plantas de azufre así como plantas para la generación de energía eléctrica (82 W). En el **cuadro I** se muestra los proyectos que se tienen en el SNR para obtener diesel UBA (SEMARNAT, INE y Pemex Refinación 2006).

CUADRO I. PROYECTOS EN EL SNR PARA OBTENER DIESEL UBA

Refinería	Modernización de plantas de destilados intermedios	Construcción de hidrodesulfuradoras de diesel
Cadereyta	3	1
Madero	2	1
Minatitlán	1	2
Salamanca	3	
Salina Cruz	4	
Tula	5	

Un estudio de evaluación socioeconómica del proyecto integral de calidad de combustibles realizado por SEMARNAT, INE y Pemex Refinación, considera que si bien no se tiene un beneficio económico directo para la paraestatal, si se obtienen a nivel nación beneficios en la salud pública y en la calidad del aire. En términos de salud pública, la introducción de combustibles de bajo contenido de azufre significaría, para el periodo 2006-2030, que se

evitarán 56 000 muertes, 166 000 casos de bronquitis crónica y 78 371 000 días perdidos de trabajo y de actividad restringida, representando un beneficio monetario presente de 11.4 miles de millones de dólares norteamericanos (SEMARNAT, INE. Pemex Refinación 2006).

En el caso de Estados Unidos, la Agencia de Protección al Ambiente determinó que los beneficios en la salud humana y en el ambiente por la reducción del azufre eran 10 veces mayores que los costos, con beneficios netos de \$86 mil millones de dólares (EPA 1999 y 2000). En Europa, los combustibles de ultra bajo azufre fueron considerados por sí solos, sin el beneficio adicional de normas de emisiones más estrictas. Ahí, el incremento en el rendimiento energético fue el principal beneficio, siendo este de 2 mil millones de dólares. Además el potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es un beneficio sustancial de los combustibles de bajo azufre (Blumberg *et al.* 2003).

La NOM-148-SEMARNAT-2006 “Contaminación atmosférica. Recuperación de azufre proveniente de los procesos de refinación de petróleo” aplica en todo el territorio nacional y es de observancia obligatoria para los responsables de la refinación del petróleo, considera que todas las corrientes que contienen azufre deben ser tratadas con el fin de recuperar el azufre y reducir la emisión de compuestos de este elemento a la atmósfera. En la **figura 1** se muestra el esquema de los parámetros que se consideraron para realizar el balance de materia de azufre en las refinerías, los cuales son S_T , S_P , S_Q y S_R (SEMARNAT 2007).

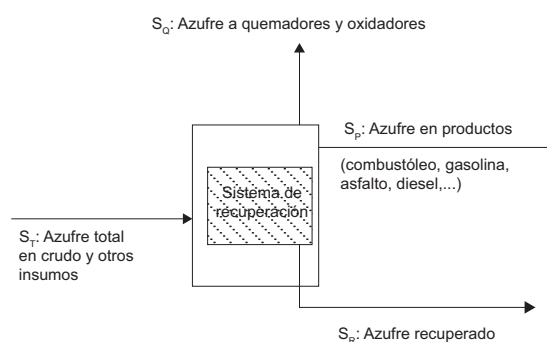


Fig. 1. Balance de materia de azufre en la refinería

Las fechas para que cada una de las refinerías del SNR cumplieran con el 90 % de recuperación fueron en el caso de las refinerías de Cadereyta, Madero y Tula a partir del 28 de noviembre de 2007, con respecto a Salamanca a partir del 1 de marzo de 2008 y para Salina Cruz y Minatitlán a partir del 1 de enero del 2010 (SEMARNAT 2007).

CUADRO II. TIPO DE CRUDO PROCESADO OCUPADO EN CADA REFINERÍA EN EL AÑO 2008

Refinería	Crudo pesado (Mbd)	Crudo ligero (Mbd)	Crudo superligero (Mbd)	Crudo reconstituido (Mbd)	Total
Cadereyta	115	94	0	0	209
Madero	120	32	0	0	152
Minatitlán	54	108	0	0	162
Salamanca	52	125	15	1	193
Salina Cruz	86	142	0	51	279
Tula	76	191	0	0	267
Total	503	692	15	52	1262

METODOLOGÍA

Para conocer la distribución de azufre en el SNR se realizó el balance de materia de azufre en cada una de las refinerías de México de acuerdo con los datos proporcionados por la solicitud número 1857600066308 requerida a Pemex Refinación mediante el IFAI. Se obtuvieron datos mensuales de los balances que se hacían en cada una de las refinerías siendo los datos proporcionados por la refinería de Cadereyta y Salina Cruz datos diarios mientras que para las refinerías de Madero, Salamanca y Tula se obtuvieron datos mensuales y para Minatitlán no se obtuvo información (IFAI 2008).

El balance de materia de azufre en las refinerías se expresa de acuerdo con la ecuación 1 y para expresar el porcentaje de azufre recuperado se considera la diferencia entre el azufre total y el azufre que queda en productos ($S_T - S_P$), tal como lo indica la ecuación 2.

$$T = SP + SR + SQ \quad (1)$$

$$\text{Recuperación (\%)} = 100\% [SR / (ST - SP)] \quad (2)$$

El cumplimiento de la NOM-148 se determinó calculando el porcentaje de recuperación de azufre y en caso de que la refinería no cumpliera se calculó la capacidad con la que deberían contar las plantas Claus de las refinerías, considerando que la norma indica que la recuperación de azufre de las refinerías de petróleo ya existentes debe ser mayor o igual a 90 % (SEMARNAT 2007).

La determinación del cumplimiento de la NOM-086 se realizó con la información proporcionada por la solicitud número 1857600066308 requerida a Pemex Refinación de las refinerías de Madero, Salina Cruz y Tula calculando el contenido de azufre en ppm de los combustibles mediante los datos de producción (BPD) y contenido de azufre (ton/día) de estos combustibles.

Otro aspecto a determinar fue que si al aplicar las NOM-086 y NOM-148, es decir si al reducir la cantidad de azufre de los combustibles y recuperar el azufre en las refinerías, las emisiones de SO_x se reducirían en las refinerías, ya que el principal problema en algunas refinerías como Tula fue que se estaba rebasando el límite de emisiones de SO_2 permitido por la NOM-022-SSA1-1993.

RESULTADOS

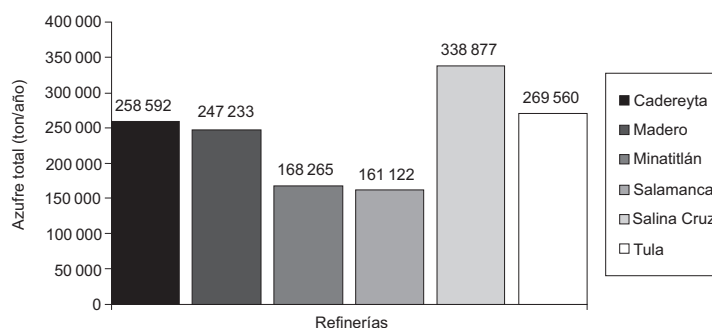
En el SNR hay cuatro tipo de crudos que se procesan y cada uno tiene las siguientes características. El crudo pesado tiene una densidad API igual o inferior a 27°, crudo ligero con una densidad API superior a 27° y hasta 38°, crudo superligero cuya densidad API es superior a 38° y crudo reconstituido, que es al cual se le han extraído naftas y otros hidrocarburos ligeros para la producción de aromáticos (PEMEX 2010a). En el **cuadro II** se muestra el total y el tipo de crudo que maneja cada una de las refinerías del SNR, ya que de este dato depende la cantidad de azufre que entra en cada una de las refinerías. En este cuadro se puede apreciar que la refinerías de Cadereyta y Madero ocupan de 55 a 79 % de crudo pesado y de 21 a 45 % de crudo ligero; mientras Minatitlán, Salamanca, Salina Cruz y Tula ocupan de 51 a 72 % de crudo ligero y de 28 a 33 % de crudo pesado. Por otra parte, solamente Salamanca y Salina Cruz trabajan con el 1 al 8 % de crudo reconstituido y Salamanca es la única que procesó 8 % de crudo superligero (PEMEX 2010b).

En el **cuadro III** se muestra la cantidad de crudo procesado de 2007 al 2009, la cuál es muy similar en todos los años y se puede apreciar que las refinerías que más crudo procesan son las refinerías de Salina Cruz y Tula (PEMEX 2010a).

Del balance de materia de azufre, se muestran los resultados globales del SNR de las corrientes

CUADRO III. CRUDO PROCESADOS EN EL SNR ENTRE 2007 Y 2009

Refinería	Crudo procesado (MBIs)		
	2007	2008	2009
Cadereyta	210.2	208.3	217.2
Madero	141.4	152.1	151.8
Minatitlán	170.1	161.6	167.1
Salamanca	187.6	192.5	192.1
Salina Cruz	271.5	279.4	277.2
Tula	288.9	267.2	289.5
Total	1269.8	1261.0	1294.9

**Fig. 2.** Azufre total en el crudo y otros insumos que se procesan en el SNR

de entrada y salida del balance de materia de azufre durante 2008. En la **figura 2** se observa que la cantidad de azufre total al año varía en cada una de las refinerías siendo la entrada de azufre en el SNR de 1 444 000 toneladas al año.

Las corrientes de salida en el balance son 3: azufre en productos, azufre enviado a quemadores y oxidadores y el azufre recuperado. Primero se analizó la cantidad de azufre en productos, considerando que la cantidad de azufre en los productos varía dependiendo de cada una de las refinerías. En el **cuadro IV** se muestra la cantidad de petrolíferos que se elaboró en el SNR de 2007 a 2009 considerando la cantidad de azufre contenida en estos petrolíferos en 2008.

En el **cuadro V** se muestra la cantidad así como el

contenido de azufre de estos productos en la refinería de Madero durante 2008.

En el **cuadro V** se muestra que la mayor cantidad de azufre (% en peso) en los productos elaborados en la refinería de Madero durante 2008 fueron el coque, asfalto y combustóleo.

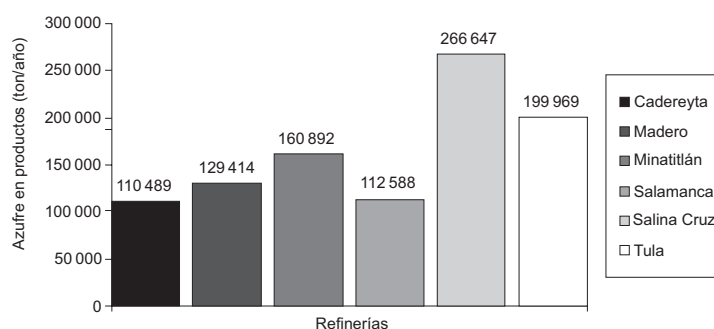
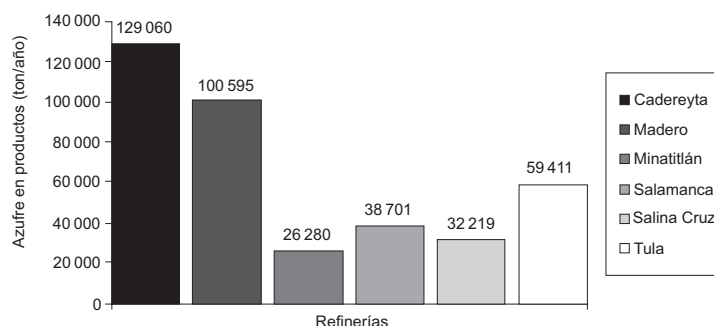
La cantidad de azufre proveniente de los productos que se elaboraron en el SNR durante 2008 al realizar el balance de materia fue de 980 000 toneladas de azufre por año. En la **figura 3** se muestra la cantidad de azufre contenida en los productos que elabora cada una de las refinerías. Las refinerías de Salina Cruz (266 647 ton S/año) y Tula (199 969 ton S/año) son las que tienen mayor contenido de azufre en los productos debido que procesan una mayor cantidad de crudo.

CUADRO IV. ELABORACIÓN DE PETROLÍFEROS Y CONTENIDO DE AZUFRE EN ELLOS (IFAI 2008 Y PEMEX 2010A)

Refinería	Elaboración de petrolíferos (MBIs)			Azufre en productos (Ton/día) Datos IFAI
	2007	2008	2009	
Cadereyta	218.5	220.1	224.5	325.3
Madero	160.6	163.4	160.7	362.6
Minatitlán	173.8	171.7	179.7	399.6
Salamanca	183.8	193.1	189.1	350.7
Salina Cruz	284.0	290.0	289.6	756.7
Tula	291.8	268.6	299.2	521.6
Total	1312.4a	1306.9a	1342.7a	2716.5

CUADRO V. CANTIDAD Y CONTENIDO DE AZUFRE EN LOS PRODUCTOS DE LA REFINERÍA MADERO

Productos	Producción (BPD)	Azufre (Ton/día)	Azufre (% en peso)
Gasolina Magna	56 302	5.17	0.067
Gasolina Premium	9 582	0.02	0.002
Turbosina	5 614	0.04	0.007
Pemex Diesel	40 327	2.03	0.038
Diesel Primario	8 355	17.69	1.541
Diluyente	5 356	17.14	2.115
Gasolina de coque	356	0.33	0.800
Combustóleo	9 757	61.62	3.961
M.P. Negro de Humo	2 409	14.05	3.358
Asfalto	3 995	33.69	5.140
Coque	1 960	171.86	6.577
Autoconsumo		31.94	
Intermedio 15	456	2.44	3.467
Variación de inventario	16 821	40.76	
Total	161 288	398.79	

**Fig. 3.** Azufre contenido en los productos elaborados por Pemex Refinación**Fig. 4.** Cantidad de azufre elemental recuperado anualmente en el SNR

Se cuantificó la cantidad de azufre recuperada en 2008 (**Fig. 4**) para cada una de las refinerías, siendo un total de 386 000 ton S al año las que se recuperan en el SNR. Debido a que Minatitlán no reportó el dato de recuperación de azufre se consideró que la planta de azufre con la que cuenta (80 ton/día) esta refinería trabajaba con una eficiencia del 90 %; por lo que la recuperación de azufre sería de 72 toneladas de S/día.

En la **figura 4** se muestra que las refinerías de Cadereyta (129 060 Ton/año) y Madero (100 595 Ton/año) fueron las que recuperaron la mayor cantidad de azufre mientras que Minatitlán (26 280 Ton/año) y Salina Cruz (32 219 Ton/año) fueron las que menos azufre recuperaron, debido principalmente a la capacidad de las plantas recuperadoras de azufre. En el **cuadro VI** se muestra la capacidad con la que contaba cada una de las refinerías en 2008.

CUADRO VI. CARACTERÍSTICAS DE LAS PLANTAS RECUPERADORAS DE AZUFRE EN EL SNR DURANTE 2008

Refinería	Plantas	Total de capacidad (ton/día)
Cadereyta	Azufre-1 (80 ton/día) Azufre-3 (120 ton/día) Azufre-4 (120 ton/día) Azufre-5 (120 ton/día) Azufre-6 (120 ton/día)	560
Madero	Azufre-3 Tren-1 (150 ton/día) Tren-2 (150 ton/día) Tren-3 (150 ton/día) Tren-4 (150 ton/día)	600
Minatitlán	Azufre (80 ton/día)	80
Salamanca	Azufre-1 U-12 (160 ton/día) Azufre-2 SRU (80 ton/día)	240
Salina Cruz	Azufre-1 (80 ton/día) Azufre-2 (80 ton/día) Azufre-3 (80 ton/día)	240
Tula	Azufre-3 (80 ton/día) Azufre-4 (80 ton/día) Azufre-5 HDR (600 ton/día) es de tres trenes cada uno de 200 ton/día	760

Para dar cumplimiento a la NOM-148-SEMAR-NAT-2006 en el SNR, Pemex Refinación planeó instalar las siguientes plantas de recuperación de

CUADRO VII. CARACTERÍSTICAS DE LAS PLANTAS RECUPERADORAS DE AZUFRE CLAUS

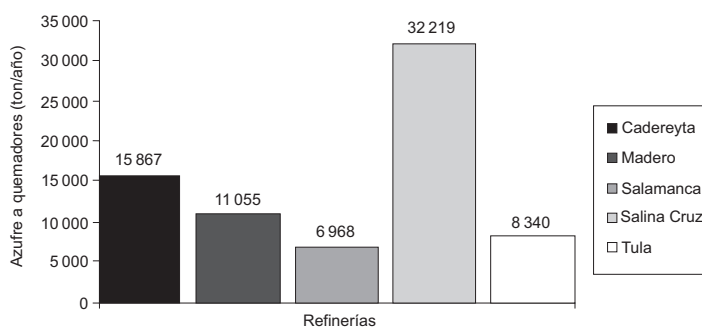
Refinería	Capacidad (ton/día)	Azufre recuperado (ton/día)	Costo (MMUSD)
Cadereyta	120	117.8	60.2
Madero	150	57	68.8
Minatitlán	50 Ton/día	44.3	40
(2 plantas)	100Ton/día*		
Salina Cruz	40	30	31.1

*Se carece de información del costo así como del azufre que se recuperaría al instalar esta planta

azufre Claus con las características que se presentan en el **cuadro VII** además de construir una planta que sustituirá a la actual U-12 cuya capacidad es de 160 ton/día de la refinería de Salamanca.

La cantidad de azufre que no fue posible recuperar y fue enviada a los quemadores así como a oxidadores térmicos en cada una de las refinerías se muestra en la **figura 5**, dando un total de 78 000 ton de azufre al año en el SNR durante 2008.

En la **figura 6** se muestra la contribución de cada una de las corrientes de salida del balance de materia, siendo la corriente de azufre en productos la de mayor contribución (68 %) lo cual quiere decir que la mayor cantidad de azufre que entra en el SNR mediante el crudo se queda en los productos que se elaboran. Estos son principalmente combustóleo, coque y

**Fig. 5.** Cantidad de azufre enviada a los quemadores y oxidadores térmicos

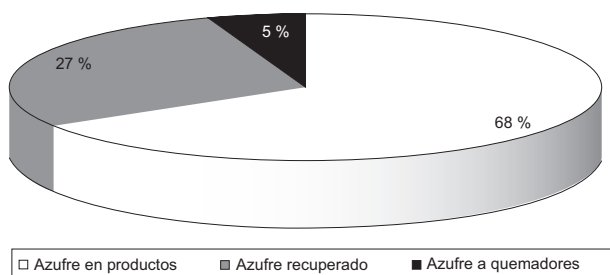


Fig. 6. Contribución de cada una de las corrientes de azufre del SNR

asfalto por mencionar algunos, posteriormente la corriente de azufre recuperado ocupa el segundo lugar, siendo este el 27 % de contribución y un 5 % en la corriente de azufre que se envía a quemadores y oxidadores térmicos.

Una vez presentados los resultados generales del balance de azufre en el SNR se muestra en el **cuadro VIII** el porcentaje de recuperación de cada una de las refinerías exceptuando la refinería de Minatitlán ya que no se contó con la suficiente información para calcular este porcentaje.

En el **cuadro VIII** de acuerdo al porcentaje de recuperación de azufre de cada una de las refinerías del SNR, las refinerías de Cadereyta, Madero y Tula cumplen con el 90 % de recuperación como lo indica la norma, mientras que para el caso de la refinería de Salamanca se tiene que aunque en promedio en el 2008 su porcentaje de recuperación fue del 88 % a partir de marzo se cumplió con un porcentaje de recuperación de azufre de más del 90 %. En el caso de la refinería de Salina Cruz se muestra que el porcentaje de recuperación fue del 49 % y que la tendencia en este proceso fue muy variada. Aunque esta refinería necesita cumplir con la norma hasta el 1 de enero de 2010, se considera que para que lo logre necesita que

recupere diariamente 178 ton; sin embargo en 2008 sólo se recuperaban 88 ton/día por lo que si se instala la planta que se consideró para cumplir la NOM-148 (**cuadro VII**), que es de 30 ton/día, se requeriría considerar otra planta de 60 ton/día para cumplir con las 178 ton/día. En el **cuadro IX** se muestra el contenido de azufre en los combustibles que se producen en las refinerías de Madero, Salina Cruz y Tula.

En el **cuadro IX** se muestra que la refinería de Madero no cumplió con la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 “Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental” en el caso de la gasolina Magna, cuyo contenido fue 578 ppm más de lo permitido por la norma (500 ppm máximo); además cabe destacar dos combustibles como la gasolina de coque con un contenido de 5830 ppm de azufre y el diesel primario con un contenido de 13 317 ppm de azufre. En el caso de la gasolina Premium y el Pemex Diesel se cumplió con el contenido de azufre de acuerdo a la norma.

Para el caso de la refinería de Salina Cruz, se observa en el **cuadro IX** que el contenido de azufre en la gasolina Magna es mayor que el permitido en la NOM-086, ya que fue de 581 ppm de azufre. Sin embargo los combustibles como la gasolina Premium, Pemex Diesel y turbosina sí cumplieron con la norma.

Para la refinería de Tula se obtuvo que la gasolina Magna, Base Magna y Premium no cumplieron con la norma ya que su contenido fue de 553, 731 y 223 ppm de azufre respectivamente. Además cabe destacar la producción de algunos combustibles con alto contenido de azufre como fueron los gasóleos de vacío con 13 050 ppm de azufre y los gasóleos ligeros primarios con 9138 ppm de azufre.

De acuerdo con la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 “Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental” a partir de

CUADRO VIII. PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DE AZUFRE EN EL SNR DURANTE 2008

Periodo	% de recuperación de azufre en las refinerías				
	Cadereyta	Madero	Salamanca	Salina Cruz	Tula
Enero	75		75	75	92
Febrero	92	89	82	58	91
Marzo	92	82	92	32	91
Abril	92	94	91	40	91
Mayo	92	90	92	57	86
Junio	90	92	92	41	91
Julio	92	92	92	26	91
Agosto	91	91	91	36	85
Septiembre	94	92		77	88
Promedio	90	90	88	49	90

CUADRO IX. CONTENIDO DE AZUFRE EN LOS COMBUSTIBLES DE LAS REFINERÍAS DE MADERO, SALINA CRUZ Y TULA

Refinería	Combustibles	Contenido de azufre (ppm)	Contenido de azufre en ppm de acuerdo a la NOM-086
Madero	Gasolina Magna	578	300 ppm prom/500ppm max
	Gasolina Premium	13	30 ppm prom/80 ppm max
	Gasolina de coque	5 830	
	Pemex diesel	317	500 ppm máximo
	Diesel primario	13 317	Diesel industrial 5000 ppm máximo
	Turbosina	44.8	3000 ppm máximo
Salina Cruz	Gasolina Magna	581	300 ppm prom/500ppm max
	Gasolina Premium	31	30 ppm prom/80 ppm max
	Pemex diesel	362	500 ppm máximo
	Turbosina	121	3000 ppm máximo
Tula	Pemex Magna oxigenada	371	300 ppm prom/500ppm max
	Pemex Magna	553	300 ppm prom/500ppm max
	Pemex Premium	223	30 ppm prom/80 ppm max
	Pemex diesel 500 ppm	422	500 ppm máximo
	Pemex diesel 300 ppm	250	500 ppm máximo
	Gasolina Base Magna	731	300 ppm prom/500ppm max
	Gasolina estabilizadora	361	300 ppm prom/500ppm max
	Gas licuado	10	140 ppm máximo
	Turbosina	150	3 000 ppm máximo
	Gasóleos ligeros primarios	9 138	Gasóleo domestico 500 ppm máximo
	Gasóleos de vacío	13 050	Gasóleo domestico 500 ppm máximo

octubre de 2008 se debió empezar con la producción de Gasolina Magna con un contenido de 30 ppm/ 80 ppm máximo en el SNR para abastecer las zonas metropolitanas como ZMVM, ZMG, ZMM por lo que fue necesario importar gasolinas. En el **cuadro X** se muestra la cantidad importada, exportada y producida durante el período de 2007 a 2009. Como se muestra en el **cuadro X** la cantidad de gasolina importada representó para el periodo de 2007 a 2009 del 68 al 75% del total de las gasolinas; mientras que la producción de gasolinas en el país representó del 24 al 32 %.

Sin embargo, fue a partir de enero de 2009 cuando se inició la producción de gasolina Pemex Magna UBA y Pemex Diesel UBA en las refinerías de Cadereyta, Salamanca y Tula. Siendo la producción

total de gasolinas UBA de 82 Mbd de los cuales la refinería de Cadereyta produjo 15 Mbd, Salamanca 19 y Tula 48. Mientras que la producción de Diesel UBA fue de un total de 45 Mbd de los cuales Cadereyta procesó 28, Salamanca 9 y Tula 7 (PEMEX 2010b). Aunque cabe destacar que la producción de Pemex Magna UBA sólo representó el 18 % del total de gasolinas y el diesel UBA representó el 13 % del total de diesel.

En el caso del diesel UBA, de acuerdo a la NOM-086 se empezaría a distribuir en enero de 2009 en las zonas metropolitanas; sin embargo fue en agosto cuando se empezó la distribución de diesel UBA en la ZMM, en julio de 2009 en la ZMG y en diciembre de 2009 en la ZMVM (PEMEX 2010b). En el **cuadro XI** se muestra la producción, importación y exportación de diesel, donde se puede apreciar que se importó del 14 al 16 % del total de diesel para el periodo de 2007 a 2009 y se exportó solamente del 1 al 3 % y del 78 al 84 % se produjo en Pemex Refinación.

Otro aspecto a determinar fue si se reducirían las emisiones de SO_x al introducir las NOM-086 y NOM-148; es decir, si al reducir la cantidad de azufre de los combustibles y recuperar el azufre en las refinerías se resolvería el problema en algunas refinerías como

CUADRO X. PRODUCCIÓN, IMPORTACIÓN Y EXPORTACIONES DE LAS GASOLINAS DE 2007 A 2009

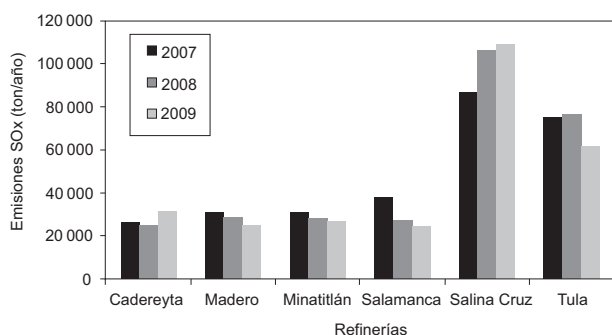
Gasolinas	2007	2008	2009
Importaciones de gasolinas (Mbd)	308	340	329
Exportaciones de gasolinas (Mbd)	4	2	2
Producción de gasolinas (Mbd)	144	109	141
Total (Mbd)	456	451	472

CUADRO XI. PRODUCCIÓN, IMPORTACIÓN Y EXPORTACIONES DE LAS GASOLINAS DE 2007 A 009

Diesel	2007	2008	2009
Importaciones de diesel (Mbd)	53	68	48
Exportaciones de diesel (Mbd)	9	6	5
Producción de diesel (Mbd)	272	269	284
Total (Mbd)	334	343	337

Tula que se estaba rebasando el límite de emisiones de SO₂ permitido por la NOM-022-SSA1-1993. En la **figura 7** se muestran las emisiones totales de cada una de las refinerías, siendo las emisiones en 2007 de 287 274 toneladas de SO₂, esta cifra aumentó a 291 586 toneladas en el 2008 y disminuyó a 279 388 en 2009 (PEMEX 2008, 2009 y 2010).

La **figura 7** muestra la contribución que tuvo cada una de las refinerías en las emisiones de SO_x totales durante el periodo de 2007 a 2009, siendo del 30 al 39 % en Salina Cruz, del 22 al 26 % en Tula, del 9 al 13 % en Salamanca, del 10 al 11 % en Minatitlán, del 9 al 11 % en Madero y del 8 al 11 % en Cadereyta. Esta cantidad que se emitió a la atmósfera en forma de SO_x corresponde principalmente a la capacidad de recuperación de azufre en cada una de las refinerías. Además en la **figura 7** se muestra que las refinerías de Madero, Minatitlán y Salamanca disminuyeron las emisiones de SO_x, mientras que en Cadereyta aumentaron de 25 978 a 31 711, en Salina Cruz se aumentó de 86 769 a 108 883 y en Tula de 75 057 a 76 578 en 2008 y en 2009 se disminuyó a 61 857 toneladas.

**Fig. 7.** Emisiones de SO_x emitidas a la atmósfera desde el 2007 al 2009

CONCLUSIONES

Se identificó la distribución de azufre (S) en el SNR mediante la realización del balance de materia de azufre con los datos proporcionados por la solicitud número 1857600066308 requerido a Pemex Refinación por medio del IFAI. El balance se llevó a cabo en cada una de las refinerías de México como

son: Cadereyta, Madero, Minatitlán, Salamanca, Salina Cruz y Tula. En el balance se determinó que el azufre total de entrada fue de 1 444 000 toneladas de azufre mientras que en la salida se obtuvieron 386 000 toneladas recuperadas mediante el proceso Claus, 980 000 toneladas de azufre en productos elaborados y 78 000 toneladas de azufre enviadas a quemadores y oxidadores térmicos, de las cuales se emitieron 291 586 ton SO_x/año.

La contribución de cada una de las corrientes de salida del balance de materia fue de 68 % para la corriente de azufre en productos, lo cual quiere decir que la mayor cantidad de azufre que entra en el SNR mediante el crudo se queda en los productos que se elaboraron, siendo estos principalmente combustóleo, coque y asfalto, posteriormente la corriente de azufre recuperado ocupa el segundo lugar, siendo este el 27 % de contribución y un 5 % en la corriente de azufre que se envía a quemadores y oxidadores térmicos.

Las refinerías de Cadereyta, Madero y Tula cumplen con el 90 % de recuperación como lo indica la NOM-148-SEMARNAT-2006 "Contaminación atmosférica. Recuperación de azufre proveniente de los procesos de refinación de petróleo", mientras que para el caso de la refinería de Salamanca se tiene que aunque en promedio en 2008 su porcentaje de recuperación fue del 88 % a partir de marzo se cumplió con un porcentaje de recuperación de azufre de más del 90 %. En el caso de la refinería de Salina Cruz se muestra que el porcentaje de recuperación fue de 49 % y que la tendencia en el porcentaje de recuperación fue muy variada. Aunque esta refinería necesita cumplir con la NOM-148 hasta el 1 de enero de 2010, se considera que para que lo haga necesita recuperar diariamente 178 ton; sin embargo en 2008 solo se recuperaban 88 ton/día por lo que se requiere una planta que recupere 90 ton/día más de azufre para cumplir con la norma.

Al hacer el análisis de la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 "Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental" se tiene que el SNR no cumplió con la norma, por lo que fue necesario importar del 68 al 75 % del total de las gasolinas y del 14 al 16 % del total de diesel para el periodo de 2007 a 2009. Cabe destacar el alto contenido de azufre en algunos combustibles elaborados en Pemex Refinación durante 2008 como la gasolina de coque con un contenido de 5830 ppm de azufre, el diesel primario con un contenido de 13 317 ppm de azufre, los gasóleos de vacío con 13 050 ppm de azufre y los gasóleos ligeros primarios con 9138 ppm de azufre. Además las refinerías de Madero, Salina Cruz y Tula no cumplieron con la NOM-086 debido

a que el contenido de azufre de la gasolina Magna fue de 578, 581 y 553-731 ppm, respectivamente, siendo lo permitido por la norma 500 ppm.

Por otra parte fue a partir de enero de 2009 cuando se inició la producción de 82 Mbd de gasolina Pemex Magna UBA y 45 Mbd de Pemex Diesel UBA en las refinerías de Cadereyta, Salamanca y Tula. Además no se cumplió con la distribución de diesel UBA como lo indicaba la NOM-086 ya que fue hasta agosto cuando se empezó la distribución en la ZMM, en julio de 2009 en la ZMG y en diciembre de 2009 en la ZMVM.

Otro aspecto que se determinó fue que la cantidad de emisiones de SO_x aumentó de 2007 a 2008 de 287 274 a 291 586 toneladas de SO_x y fue hasta 2009 que se disminuyeron las emisiones a 279 388 ton SO_x. Siendo la contribución del 30 al 39 % en Salina Cruz, del 22 al 26 % en Tula, del 9 al 13 % en Salamanca, del 10 al 11 % en Minatitlán, del 9 al 11% en Madero y del 8 al 11% en Cadereyta del total de óxidos de azufre emitidos a la atmósfera durante el periodo de 2007 a 2009.

AGRADECIMIENTO

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT) por la beca de maestría recibida por Fabiola Selene Alcántar González.

REFERENCIAS

- Blumberg K.O., Walsh M.P. y Pera C. (2003). Low sulfur gasoline and diesel, the key to lower vehicle emissions [en línea]. http://www.theicct.org/documents/Low-Sulfur_ICCT_2003.pdf 04/07/08.
- EPA (1999). Regulatory Impact Analysis- Control of air pollution from new motor vehicles: Tier 2 motor vehicle emissions standards and gasoline sulfur control requirements. Environmental Protection Agency. Washington, D.C. USA.
- EPA (2000). Regulatory Impact Analysis: Heavy-duty engine and vehicle standards and highway diesel fuel sulfur control requirements. Environmental Protection Agency. Washington, D.C. USA.
- Fredriksson M. (2000). Impact of a 10 ppm sulphur specification for transport fuels on the EU refining industry [en línea]. <http://www.concawe.org/Doc-ShareNoFrame/docs/1/EHFGLAFAAKADIJINK-MOLHCGCPDBY9DBYAY9DW3571KM/CEnet/docs/DLS/2002-00231-01-E.pdf> 17/06/08.
- Gary J.H. y Handwerk G.E. (2001). *Petroleum Refining Technology and Economics*. Cuarta Edición. Editorial Marcel Dekker Inc. New York, EUA. 441p.
- IFAI (2008). Solicitud de Información Pública o de Acceso a Datos Personales No. 1857600066308. Instituto Federal de Acceso a la Información. Archivo electrónico en CD. México. 72 p.
- PEMEX (2008). Informe de Desarrollo Sustentable 2007. Petróleos Mexicanos. Informe. México. 124p.
- PEMEX (2009). Informe de Responsabilidad Social 2008. Petróleos Mexicanos. Informe. México. 124p.
- PEMEX (2010). Informe de Responsabilidad Social 2009. Petróleos Mexicanos. Informe. México. 110 p.
- PEMEX (2010a). Anuario estadístico 2010. Petróleos Mexicanos. Informe. México. 77p.
- PEMEX (2010b). Memorias Laborales 2009. Petróleos Mexicanos. Informe. México. 317 p.
- SEMARNAT (2006). Norma Oficial Mexicana NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005. Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 30 de enero de 2006.
- SEMARNAT (2007). Norma Oficial Mexicana NOM-148-SEMARNAT-2006. Contaminación atmosférica. Recuperación de azufre proveniente de los procesos de refinación del petróleo. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 28 de noviembre de 2007.
- SEMARNAT, INE y PEMEX REFINACIÓN. (2006). Estudio de evaluación socioeconómica del proyecto integral de calidad de combustibles. Reducción de azufre en gasolinas y diesel. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Pemex Refinación. Estudio. México. 77p.