UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ZARAGOZA

PROYECTO PARA DISMINUIR LAS EMISIONES DE SO_2, APLICANDO EL METODO SUPERCLAUS EN EL COMPLEJO PROCESADOR DE GAS DE NUEVO PEMEX, TABASCO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A :

KARINA CUEVAS VAZQUEZ

DIRECTOR DE TESIS

I.Q. LUIS FERNANDO COVANTES RIVA PALACIO

MEXICO, D. F. NOVIEMBRE 2004

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

JEFATURA DE LA CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/013/04

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: CUEVAS VÁZQUEZ KARINA
P r e s e n t e.

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

Presidente:	**M. en I. Alejandro Rogel Ramírez**
Vocal:	**Ing. Luis Fernando Covantes Riva Palacio**
Secretario:	**Biol. Guillermo González Martínez**
Suplente:	**I.Q. Balbina Patricia García Aguilar**
Suplente:	**I.Q. Judith Ventura Cruz**

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D. F., 24 de Marzo de 2004

EL JEFE DE LA CARRERA

M. en C. ANDRÉS AQUINO CANCHOLA

♣

AGRACECIMIENTOS

Le doy las gracias a Dios por haberme permitido la salud, y las fuerzas para la realización de este proyecto.

Así como le doy las gracias a cada una de las personas que me brindaron su apoyo.

Gracias a la gente de PEMEX Gas y Petroquímica Básica (Proyectos y Construcción).

Ing. Virginia Bravo

A mi director de tésis el Ing. **Luis Fernando Covantes Riva Palacio**. Gracias por todos sus consejos, sus enseñanzas y su gran sabiduría. Su gran apoyo y amista, pero sobre todo por ser una gran persona.

Gracias a mis compañeros de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, en especial a:

Concepción Alvárez Mariscal.
Aurelio Reyes Morales
Zula. Y. Sandoval Villanueva.

Es especial quiero darle las gracias a toda mi familia por su apoyo, comprensión y cariño.

A mis hermanas:

Elia Cuevas Vázquez.

Irma Cuevas Vázquez.

A mis sobrinos:

Saraid Olvéra Cuevas
Itzel Olvéra Cuevas
Angél Alexis Hernández Cuevas
Ismael Alfredo Hernández Cuevas
David Aarón Olvéra Cuevas.

Y muy especialmente quiero agradecer a una persona muy importante en mi vida, a esa persona que siempre ha estado conmigo a mi lado cuidándome, dándome su cariño, su amor, su apoyo y su confianza. Gracias a:

MI MADRE la Señora. Caridad Vázquez Cruz.

A si como quiero agradecer a todas las demás personas que me han apoyado en mis estudios, gracias a:

La Sra. Gregoria Domínguez

A mi gran amiga la

Dr. María Elena Sánchez Sánchez.

Y gracias a ti mi amor por apoyarme en todo lo que hago, por tu amor, confianza y respeto, gracias. **Ing. Juan Carlos Flores Fuentes**.

A TODOS USTEDES GRACIAS.

PROYECTO PARA DISMINUIR LAS EMISIONES DE SO_2, APLICANDO EL MÉTODO SUPERCLAUS EN EL COMPLEJO PROCESADOR DE GAS DE NUEVO PEMEX, TABASCO.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN **1**

1.1 USOS DEL AZUFRE 6

2. RESUMEN **8**

3. GENERALIDADES **9**

OBJETIVO 9

3.1 ANTECEDENTES 9
3.1.1 EL PETRÓLEO 11
3.1.2 PROCESAMIENTO DEL GAS NATURAL 12
3.1.3 EL PROCESO DE ENDULZAMIENTO 14

3.2 ANTECEDENTES DEL PROCESO CLAUS 15

3.3 DESARROLLO DEL PROYECTO 18
3.3.1 PLANEACIÓN DEL PROYECTO 18
3.3.1.1 ASIGNACIÓN DE CONTRATO 18
3.3.2 INGENIERÍA DEL PROYECTO 19
3.3.2.1 INGENIERÍA BÁSICA 19
3.3.2.2 HAZOP (HAZARD & OPERABILITY) 19
3.3.2.3 INGENIERÍA DE DETALLE 21
3.3.2.4 MAQUETA ELECTRÓNICA 21
3.3.2.5 INGENIERÍA APROBADA 21
3.3.3 OPERACIÓN DE LA PLANTA 21
3.3.3.1 CONSTRUCCIÓN 21
3.3.3.2 PRUEBA 21
3.3.3.3 ARRANQUE 22
3.3.3.4 PRUEBA DE DESEMPEÑO 22
3.3.3.5 CIERRE DE CONTRATO 24
3.3.3.6 ENTREGA A ÁREA OPERATIVA 25

4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DE GAS DE COLA 26

4.1 POR DEBAJO DEL PUNTO DE ROCIO 27
4.1.1 MCRC 27
4.1.2 SULFREEN 28
4.1.3 CBA 29

4.2 ABSORCIÓN CON AMINAS 31

4.3 OXIDACIÓN SELECTIVA 32
4.3.1 SUPERCLAUS 33

4.4 ANALISIS COMPARATIVO 34

4.5 CRITERIOS DE LA SELECCIÓN DEL PROCESO CLAUS. 37
4.5.1 EXPERIENCIAS DE LOS PROCESOS SUPERCLAUS Y CBA. 37
4.5.1.1 PROCESO CBA. 37
4.5.1.2 PROCESO SUPERCLAUS. 38
4.5.1.3 IDENTIFICACIÓN DE FALLAS Y CONSECUENCIAS EN UNA PLANTA CBA EN RELACIÓN A UNA PLANTA SUPERCLAUS *41*
4.5.2 SELECION DEL PROCESO SUPERCLAUS. 42

5. DESCRIPICION DEL PROCESO CLAUS Y SUPERCLAUS 46

5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO CLAUS 46
5.1.1 ETAPA TÉRMICA 46
5.1.1.1 QUEMADOR 47
5.1.1.2 HORNO DE REACCIÓN *48*
5.1.1.2.1 Termodinámica y Cinética de la Etapa Térmica 49
5.1.1.3 RECUPERADOR DE CALOR 54
5.1.1.4 CONDENSADOR *55*
5.1.2 ETAPA CATALÍTICA 57
5.1.2.1 HIDRÓLISIS DEL CS_2 Y COS 57
5.1.2.2 REACCION CLAUS 59
5.1.2.2 1 Termodinámica y Cinética de la Etapa Catalítica 62

5.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO SUPERCLAUS 68

5.3 PROCESO DE DESGASIFICACIÓN DE AZUFRE SHELL 72

6. RESULTADOS DE LA PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN DE LA PLANTA. 76

6.1 RESULTADOS DEL ARRANQUE DE LA PLANTA 76

6.2 CONDICIONES DE LA OPERACIÓN DE LA PLANTA 90

7. ANÁLISIS DE COSTOS 99

7.1 COMPARACION DE LOS COSTOS ANUALES EQUIVALENTES DE LOS PROCESOS CBAY SUPERCLAUS 99

8. CONCLUSIONES 104

9. BIBLIOGRAFÍA 106

9.1 APENDICE I 111

9.2 APENDICE II 137

9.3 GLOSARIO 140

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, casi todo el mundo ha tomado conciencia sobre la necesidad de disponer de un ambiente aceptable en todos los órdenes, siendo la contaminación uno de los problemas más sensibles desde el punto de vista social. La realidad en estos momentos es que muchas empresas, tratan sus problemas **medioambientales** en un nivel muy superficial por lo que deben ponerse en marcha programas de información y diálogo entre todos los implicados: empresas, administradores, defensores del ambiente, técnicos e ingenieros ambientales. El desarrollo industrial se efectúo para mejorar la calidad de vida de la población y sin embargo generó perturbaciones ambientales de todo tipo, las cuales no existían.[1]

Uno de los problemas que vive la humanidad actualmente es el deterioro de nuestro ecosistema, y esto cada vez es más perjudicial para los seres vivos. El desarrollo industrial, la sobreexplotación de los recursos naturales y el inadecuado uso del suelo, son tan sólo algunos de los elementos que han inducido un proceso irreversible, asociados a severos problemas ambientales cuya resolución requerirá de un extraordinario esfuerzo colectivo.

El daño al ambiente que en principio no se detectaba pero que durante décadas ha experimentado un intenso crecimiento, con un deficiente control ambiental; debido a una gran expansión económica y demográfica. Los tipos de contaminación potencialmente mayores, que deben ser controlados cuidadosamente, son el vertido de líquidos en los ríos, lagos y océanos, y la emisión de vapores contaminantes a la atmósfera.

La contaminación del aire es uno de los problemas ambientales más importantes. Las causas que originan esta contaminación son diversas, pero la mayor parte es provocada por las actividades domésticas, comerciales, agropecuarias e industriales. Existen otras actividades, tales como la fundición y la producción de sustancias químicas, que pueden provocar el deterioro en la calidad del aire si se realizan sin control alguno. La combustión empleada para obtener calor, generar energía eléctrica o movimiento, es el proceso de emisión de contaminantes más significativo.

Por su parte la industria petrolera se caracteriza por sus enormes dimensiones, debido a la difusión e importancia que han adquirido sus productos en la vida moderna; pero estos también han generado una gran cantidad de contaminantes, los cuales son principalmente SO_2 (dióxido de azufre), SO_3 (trióxido de azufre), CO_2 (dióxido de carbono), NO_x (óxidos de nitrógeno), hidrocarburos ligeros, mercaptanos de olor desagradable, partículas de polvo y hollines (las cantidades vertidas a la atmósfera varían según sea el origen del petróleo crudo).

Una de las corrientes de desechos generadas en los Complejos Procesadores de Gas de PEMEX (CPG) para obtener combustibles es el gas ácido, el cual esta formado principalmente de CO_2 y H_2S (ácido sulfhídrico). Este ácido se debe transforma en SO_2 para poder ser descargado a la atmósfera.

Ya que los *problemas que causan el H_2S y el SO_2* son los siguientes:

El ***H_2S***: Es un gas tóxico, incoloro y de olor desagradable que, comúnmente se describe como de huevo podrido, el umbral del sentido del olfato es de 0.15 ppm (partes por millón). En la naturaleza es emitido por la actividad volcánica. En algunas áreas industrializadas hasta el 90% del emitido procede de las actividades humanas, aunque en los últimos años esta disminuyendo su emisión en muchos lugares gracias a las medidas adoptadas. El H_2S es un contaminante que normalmente sus bajos niveles de emisión hacen que no alcancen concentraciones dañinas.

En la **salud**, el ácido sulfhídrico es un gas, y por tanto el aparato respiratorio es el principal afectado por la acción del mismo. Los efectos tóxicos varían considerablemente con la concentración (Tabla 1.1) y también en cierta medida depende de la susceptibilidad individual. Actúa directamente sobre el sistema nervioso central, provocando parálisis de centro respiratorio (es a través del torrente sanguíneo que reacciona con algunas enzimas, lo que provoca inhibición de la respiración celular), parálisis pulmonar y la muerte.
Los primeros síntomas de intoxicación, de manera general, son: náusea, vómito, diarrea, irritación de la piel, lagrimeo, falta de olfato, fotofobia y visión nublada.
Los síntomas de una intoxicación aguda son: taquicardia (aumento de la velocidad cardiaca) o bradicardia (disminución de la velocidad cardiaca), hipotensión (presión sanguínea baja), palpitaciones, arritmia cardiaca. Además, puede presentarse respiración corta y rápida, edema bronquial o pulmonar y depresión pulmonar. Los efectos neurológicos en estos casos son cansancio, confusión, delirio, amnesia, dolor de cabeza y sudoración. Se presentan también calambres musculares, temblores, salivación excesiva, tos, convulsiones y coma.

Inhalación: Este compuesto se empieza a detectar por el olfato humano a concentraciones mucho más bajas de las que pueden tener efectos nocivos para la salud, si la exposición es a baja concentración por pocas horas, los síntomas son: dolor de cabeza, náusea y pérdida de peso. Pero exposiciones a corto plazo de concentraciones altas pueden provocar síntomas severos, por ejemplo, una exposición prolongada a concentraciones mayores de 250 ppm causa edema pulmonar y neumonitis bronquial.
Por otra parte, si la concentración es mayor, entonces el daño al sistema nervioso es el principal problema. Así, una exposición a 500 ppm por 30 minutos causa dolor de cabeza, cansancio, excitación, diarrea e inconsciencia. Se ha informado, incluso, de casos de encefalopatías y polineuritis. El respirar sólo unos minutos en atmósferas con 1000 ppm de

este producto, causa inconsciencia de la cual se puede recuperar rápidamente, si se atiende a tiempo, pero que puede ser mortal por parálisis respiratoria.

Contacto con ojos: se produce irritación de la conjuntiva, provocando fotofobia, queroconjuntivitis y vesiculación del epitelio de la córnea, aún a concentraciones de 20 ppm o más bajas, por algunas horas. Si la exposición es repetida, se presentan además de los síntomas mencionados, lagrimeo, dolor y visión nublada. Un envenenamiento crónico provoca hinchazón de la conjuntiva y los párpados.

Concentración en aire	Tiempo de exposición	Efectos
0.14 – 0.28 mg/m^3 (0.1 – 0.2 ppm)	1 hora	Umbral odorífico.
4.2 – 7 mg/m^3 (4.2 – 7 ppm)	30 mín	Olor molesto.
14 mg/m^3 (10 ppm)	1 hora	Valor límite umbral.
70 – 140 mg/m^3 (50 – 100 ppm)	1 hora	Umbral lesión grave ocular.
210 – 350 mg/m^3 (150 – 250 ppm)	1 hora	Parálisis olfativa.
420 mg/m^3 (300 ppm)	1 hora	Índice inmediato peligroso para la vida y la salud.
420 – 700 mg/m^3 (300 – 500 ppm)	30 – 60 mín	Edema pulmonar.
700 – 1400 mg/m^3 (500 – 1000 ppm)	30 mín	Apnea y estimulación intensa del sistema nervioso central.
1400 – 2800 mg/m^3 (1000 – 2000 ppm)	Inmediatamente	Colapso inmediato con parálisis respiratoria.

Tabla 1.1 Efectos del H_2S en los humanos.

A pesar de que el H_2S es un gas extremadamente tóxico, el cianuro de hidrógeno es ligeramente un poco más tóxico que el ácido sulfhídrico, y éste es mucho más tóxico que el monóxido de carbono.

En **otros**, provoca la corrosión de los materiales de carácter metálico, reducción de la visibilidad en áreas contaminadas, formación de depósitos ácidos y disminución en el crecimiento de las plantas.

El ***SO_2***: Importante contaminante primario, es un gas venenoso, incoloro, no inflamable, en altas concentraciones tiene un olor picante, es más pesado que el aire, tiene una fácil condensación. Su vida media en la atmósfera es corta, de unos 2 a 4 días. El SO_2 es producido por la combustión de materiales fósiles (especialmente de petróleo y carbón, que por su origen contienen azufre) y por muchos procesos de la industria química. En conjunto, más de la mitad del que llega a la atmósfera es emitido por actividades humanas, sobre todo por la combustión de carbón, petróleo y por la metalurgia. Ello contribuye a la lluvia ácida, de la que sus principales iniciadores son el SO_2 y los NO_x. Esta se forma cuando dichos componentes (el óxido de azufre y los óxidos de nitrógeno) reaccionan con el vapor de agua y oxígeno atmosférico, y se forman en presencia de la luz solar en ácido sulfúrico y ácido nítrico, los cuales son arrastrados por las gotas de lluvia, copos de nieve o como partículas sólidas y transportadas hasta la superficie terrestres. La lluvia tiene naturalmente un pH de reacción ácida (cercano a 5−6). La escala pH mide la acidez y la alcalinidad; una solución con pH 7 es neutra, cualquier valor superior es alcalino y los valores inferiores son ácidos. En la naturaleza, las erupciones volcánicas y algunos pasos de los ciclos del nitrógeno y el azufre pueden acidificar la lluvia. También el SO_2 se disuelve ligeramente en el agua formando ácido sulfuroso (H_2SO_3) el cual acelera la corrosión.

En la **salud**, los efectos tóxicos varían hasta cierto punto con la susceptibilidad individual (Tabla 1.2). El dióxido de azufre al penetrar a las vías respiratorias destruye las pilosidades o cilios del epitelio del sistema pulmonar, que tienen la función de evacuar partículas de polvo y aerosol de los bronquios. Este efecto se aplica especialmente en los niños, que pueden desarrollar una enfermedad aguda, que se manifiesta por una tos seca y fiebre, y en casos extremos, puede producir la muerte por asfixia. Los efectos tóxicos de los óxidos de azufre para el ser humano son dificultad para respirar, debido al espasmo o contracción de los bronquios, irritación de la garganta, de los ojos y tos, reduciendo a su vez la capacidad pulmonar y causando ronquera, respiración entre cortada y presión en el pecho. Los asmáticos son particularmente sensibles al azufre. Muerte instantánea por envenenamiento ocurre muy poco. Sin embargo, la sofocación si puede causar la muerte rápidamente. Es posible una cierta inmunización del SO_2, a un máximo de 30 a 50 ppm. Los seres humanos pueden tolerar un máximo de 20 ppm sin efectos adversos. Concentraciones más altas pueden dar a la víctima un aspecto pálido, causar un sabor desagradable en la boca y pueden incluso hacer los nervios gustativos insensibles. Efectos adicionales son la pérdida del apetito y constipación También se ha encontrado una relación entre la presencia de óxidos de azufre en la atmósfera y el aumento de muertes por enfermedades crónicas, cardiovasculares y respiratorias.

Concentración (ppm)	Tiempo de exposición	Efectos
0.15 – 0.25	1 – 4 días	Respuestas cardiorrespiratorias.
1.0 – 2.0	3 – 10 mín	Respuestas cardiorrespiratorias en individuos sanos.
5.0	1 hora	Sofocamiento e incremento de resistencia en los pulmones.
10.0	1 hora	Peligro severo, algunas hemorragias nasales.
50 – 100	30 – 60 mín	Concentración máxima permitida.

Tabla 1.2 Efectos del SO_2 en los humanos.

En la **flora y fauna**, la influencia sobre la vegetación se manifiesta desde daños a las hojas hasta la muerte de las plantas. Comienza en las puntas de las hojas que se ponen amarillas y, en casos extremos, la hoja se enrolla y muere. En las áreas de cultivo se malogran las cosechas. Los óxidos de azufre pueden inhibir el crecimiento de las plantas y ser letales para algunas de ellas cuando están expuestas a concentraciones moderadas durante largos periodos. La lluvia ácida aumenta la acidez de los lagos y los cauces de agua dulce. Y somete a una intensa lixiviación (lavado) los suelos de las zonas forestales, arrastrando con mucha facilidad los minerales esenciales como el fósforo, el calcio y el magnesio, lo que priva a los árboles de estos nutrientes; las consecuencias de esta lluvia ácida sobre el clima y la vida terrestre son múltiples. La acidificación de ríos y lagos hace que la vida en ellos sea insostenible y muera la mayor parte de la fauna acuática.

En **otros aspectos**, cada año se liberan al ambiente 100 millones de toneladas de dióxido de azufre[2]. Por lo cual, la lluvia ácida contribuye en la corrosión de metales y ha comenzado a corroer de forma grave las fachadas ornamentales, los vitrales, las estatuas y diversos monumentos, dañando el patrimonio cultural, como el circuito histórico de la Ciudad de México. Además algunos países en desarrollo como Nigeria, India, Colombia, Venezuela y Brasil, ya empieza a sentir los estragos de la lluvia ácida y no solo en estos países tercermundistas, sino también en los de primer mundo, como en el partenón de Grecia, en los grandes lagos de USA y Cánada, y todos los lagos de Europa, así como todo el resto del mundo. Además del deterioro de la cubierta viva del planeta.

Además, el azufre es así mismo un veneno fuerte para muchos catalizadores, por lo cual los compuestos que contiene azufre tienen que ser removidos para evitar la corrosión, pero así mismo por razones ambientales.

A pesar de todo esto, el H_2S es mucho más nocivo que el SO_2.

1.1 USOS DEL AZUFRE

El azufre líquido producido en PEMEX, es vendido a diferentes industrias, sus principales usos son para la producción de ácido sulfúrico, y el resto es usado en la vulcanización de caucho, fertilizantes, industria del papel, farmacéuticos, explosivos y otros (Gráfica 1.1).

El azufre es una materia prima muy importante para la producción del *ácido sulfúrico*, el cual se utiliza principalmente en las *baterías de los automóviles* para producir electricidad.

En la *vulcanización del caucho*; en este proceso los átomos de azufre establecen enlaces entre las cadenas poliméricas, esto dificulta su movimiento con lo que se consigue un material más duro, resistente y que no se reblandece por efecto de la temperatura. Los neumáticos están construidos por capas de caucho vulcanizado, fibras textiles e hilos metálicos.

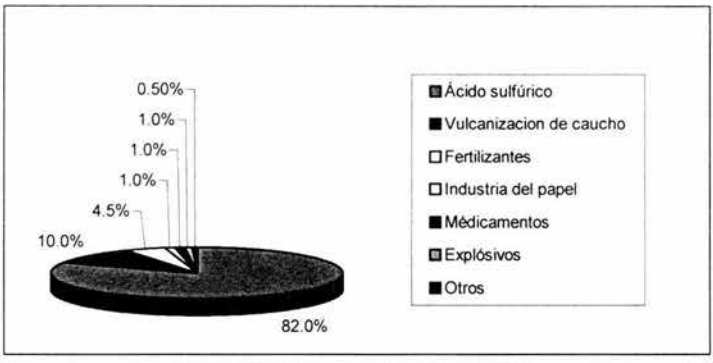
En *fertilizantes* junto con pesticidas, insecticidas y funguicidas. En los funguicidas y pesticidas, el azufre a sido tradicionalmente usado ya que ha desarrollado una alta efectividad en los funguicidas orgánicos, además el azufre generalmente es aplicado en spray, y esto tiene la ventaja de no ser consumido directamente por la planta; ya que los residuos son lavados por la lluvia y actúan como nutrientes en el suelo. Y en fertilizantes el azufre se destina a la fabricación de dióxido de azufre el cual a su vez se destina a la síntesis de ácido sulfúrico, materia prima en la elaboración de fertilizantes:

$$SO_2 \longrightarrow SO_3 \longrightarrow H_2SO_4 \longrightarrow \text{fertilizantes}$$

En la manufacturación de la pulpa de la madera para la *industria del papel*, en donde se usa el proceso del sulfito en el cual, el azufre es quemado a dióxido de azufre, entonces éste es convertido a ácido sulfuroso y subsecuentemente a sulfito, el principal componente del licor de la pulpa.
En *medicina*, el azufre ha cobrado gran relevancia por la extensión del uso de las sulfamidas y su utilización en numerosas pomadas tópicas.

La *pólvora* es una mezcla de azufre, carbón y nitrato potásico que fue inventada en China hace más de dos mil años. Es el primer explosivo obtenido y aún hoy se utiliza con exceso en la elaboración de material pirotécnico y en otros menesteres algo menos festivos.

En *otros* , además el azufre líquido tiene otros usos como es en la industria de la azúcar, en la fabricación y conservación de vinos y cervezas, en el plan nutricional, en la construcción,,,.



Gráfica. 1.1. Usos del azufre líquido.

[1] Contaminación del aire Origen y Control, Wark. Kenneth Warner, Edit. Limusa Noriega Editores, Méx. D.F, 2da edic. 1998. Pág. 17.
[2] Ecología Industrial : Ingeniería Medioambiental aplicada a la industria y a la empresa, Mariano Seoanez Calva, Edit. Ediciones Mundi-Presa, Madrid. España, 1995. pág. 437.

2. RESUMEN

Cada vez se emite un mayor número de contaminantes a la atmósfera. La industria petrolera se caracteriza por sus enormes dimensiones de generar combustibles para la vida moderna, pero también existe la parte no grata, la generación de contaminantes.
En el Procesamiento del gas natural para generar combustibles, existe la etapa de Endulzamiento, la cual se encarga de eliminar los compuestos no deseados (que generan problemas en el proceso) para poder procesar el gas. Estos compuestos no deseados son principalmente el H_2S y el CO_2 (gas ácido), de los cuales el ácido se descarga a la atmósfera en forma de SO_2, esto repercute gravemente al ambiente, ya que contribuye a la lluvia ácida, generando así graves problemas como la acidificación de ríos y lagos, por lo cual muere la fauna acuática, además que deteriora la flora y los edificios ornamentales, así mismo causa problemas respiratorios.

Por ello el gas ácido necesita ser tratado para poder recuperar el azufre del ácido sulfhídrico en forma de azufre elemental y lograr que una menor cantidad del H_2S sea descargada en forma de SO_2.

El Complejo Procesador de Gas Nuevo PEMEX, en Tabasco incluye en su procesamiento las Unidades Recuperadoras de Azufre bajo el método Claus, el cual esta formado por una etapa térmica en donde el H_2S es parcialmente oxidado a SO_2, y también se obtiene una recuperación de azufre por la reacción claus (en esta unidad el azufre se obtiene principalmente por la disociación del ácido sulfhídrico), la siguiente etapa es la catalítica en donde el H_2S reacciona con el SO_2 para formar azufre elemental, esta es la reacción Claus, dos etapa Claus son utilizas en este proceso, con esto se logra una gran recuperación de azufre, pero no alcanza a cumplir con la NOM-137-SEMARNAF-2003. Por lo cual se necesita adicionar otro proceso. El cual es un Tratamiento de Gas de Cola.
Existen diversos tratamiento del gas de cola pero el más adecuado a utilizar es el SUPERCLAUS, el cual se adiciona fácilmente, ya que el gas de cola que abandona la etapa Claus pasa por la etapa SUPERCLAUS en donde el gas ácido es oxidado directamente a azufre elemental mediante una selección catalítica, por lo cual es como si fuera otra etapa Claus, debido a esto es más conveniente utilizar ese proceso, además en cuanto a costos es el más favorable. Ya que aunque no es un proceso rentable, se tiene que ver la manera de invertir poco y lograr grandes recuperaciones.

Con esto se logra disminuir las emisiones de SO_2 en el Complejo Procesador de Gas Nuevo PEMEX, en Tabasco en un 77%. Y se contribuye a que exista un ambiente limpio y sano, además se toma la consideración de que PEMEX no solo piensa en generar combustibles para hacer la vida más fácil, sino que piensa en la calidad de vida poniendo en marcha estos proyectos.

3. GENERALIDADES

OBJETIVO:

Disminuir las emisiones de dióxido de azufre en el Complejo Procesador de Gas de Nuevo PEMEX, Tabasco, recuperando el azufre del gas ácido, por medio del tratamiento de gas de cola Superclaus.

3.1 ANTECEDENTES

Hasta el período de 1965-1970, era una práctica común el quemar simplemente el gas ácido, junto con otros gases ligeros, como combustible de refinería, pues la conversión de los gases residuales hasta azufre elemental no es económica. Las recientes regulaciones sobre contaminación del aire, sin embargo, obligan a que la mayor parte del ácido sulfhídrico se elimine del gas combustible de refinería y se convierta en azufre elemental. Muchos crudos contienen, además de H_2S, algo de dióxido de azufre disuelto, que a través de las destilaciones llega hasta el gas combustible de refinería, los cuales se eliminan simultáneamente del gas combustible mediante diversos procesos.

Como en todo el mundo la presión incrementa para un menor impacto ambiental de los compuestos de azufre, el limite de los productos de azufre esta siendo minimizado por el orden de su magnitud. Así, grandes cantidades de gas ácido (H_2S) deben ser tratadas. Esta es la verdad de todos los combustibles fósiles que se están tratando, incluyendo plantas de poder, plantas de cogeneración y gasificaciones, plantas de gas natural y especialmente refinerías de petróleo crudo. Muchos países se ven en la necesidad de reducir el impacto de la lluvia ácida y otras emisiones de azufre que causan problemas, por lo cual están incrementando sus puntos de recuperación de azufre. La agencia de protección al ambiente de USA (EPA), esta limitando las emisiones de azufre, este país fue el que empezó a tener menores emisiones en el mundo, y ahora estas políticas están siendo extendidas por varios países del suroeste de Asia. Así mismo, países aislados como Chile y Phillipinas han estado regulando las emisiones de azufre y requiriendo algunos niveles de recuperación de azufre. Este incremento de presión ambiental en el mundo ha promovido un gran número de nuevos procesos ambientales.

Los países desarrollados empiezan, muy lentamente, a establecer legislaciones que intentan mitigar las emisiones de dióxido de azufre y óxido de nitrógeno, imponiendo restricciones a las industrias pesadas y automotrices, y obligándolos a rediseñar los sistemas para filtrar estos venenos ambientales. Sin embargo, los ambientalistas desearían mayores niveles de severidad y mayor rapidez en la implementación de estas políticas.

En México el deterioro de nuestros ecosistemas, la disminución de los recursos naturales y las alteraciones en la calidad del ambiente, despertaron el interés de todos los sectores de la población para cambiar la conducta tradicional sobre la concepción del medio y sus componentes, por lo que se emprendió la tarea de incorporar instrumentos de política ambiental como son el ordenamiento ecológico y la evaluación del impacto ambiental.

Actualmente la SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) a través de la PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente) la cual es una institución encargada de proteger los recursos naturales y el ambiente en todo el territorio nacional, a fin de que todos los seres humanos puedamos vivir en armonía. Esta dependencia en base al Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósferas, establece que:

- La calidad del aire debe ser satisfactoria en todos los asentamientos humanos y las regiones del país.
- No deben emitirse contaminantes a la atmósfera tales como olores, gases o partículas sólidas y líquidas que puedan ocasionar desequilibrio ecológico o dañar el ambiente.
- Las emisiones contaminantes, generadas por olores, gases, así como de partículas sólidas y líquidas a la atmósfera que se generan por fuentes fijas, no deben exceder los niveles máximos permisibles de inmisiones y emisiones por contaminantes y por fuentes de contaminación que se establecen en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM's).
- Se deben emplear equipos y sistemas que controlen las emisiones contaminantes a la atmósfera para que estas no rebasen los niveles máximos permisibles, conforme a lo que establecen las NOM's.
- Que las NOM's de carácter ambiental deben ser obligatorias.

Con la entrada en vigor de esta Ley, se distribuyeron las competencias entre la Federación, los estados y los municipios, para la aplicación del procedimiento de evaluación del impacto ambiental.

La norma en México aplicable a los CPG es la NOM-137-SEMARNAT-2003 que determina la concentración máxima permisible de emisiones de H_2S, y las recuperaciones de azufre en las plantas desulfuradoras de gas amargo.

Los motivos que tiene PEMEX para impulsar el proyecto de construcción o de modificación de plantas recuperadoras de azufre se basa en lo siguiente:

1.- Compromiso de PEMEX con la comunidad y el gobierno:
- Ejecución del Programa Ambiental Tabasco que incluye:
  - Protección del medio ambiente.
  - Disminución de emisiones de SO_2 a la atmósfera.

- Modernización de plantas recuperadoras de azufre.
- Consolidación de la imagen de PGPB en la conservación del medio ambiente.

2.- Requerimientos operativos y de seguridad en las instalaciones de PEMEX Gas y Petroquímica Básica (PGPB):

- Reducción en las emisiones de compuestos de azufre a la atmósfera con el fin de minimizar la corrosión en los centros procesadores de gas.
- Incorporación de sistemas que mejoran la seguridad en el manejo de azufre líquido.
- Incremento en la seguridad operativa por la adición de sistemas modernos de control.

Por todo esto al H_2S en el gas ácido, de los CPG de PEMEX se le aplica un tratamiento para poder recuperar el azufre, y de esta forma liberar menor cantidad de dióxido de azufre a la atmósfera. El cual como ya se señalo también es un contaminante pero menos letal que el ácido.

3.1.1 EL PETRÓLEO

El petróleo se encuentra en grandes cantidades bajo la superficie terrestre y se emplea como combustible y materia prima para la industria química y petrolera. Las sociedades industriales modernas lo utilizan sobre todo para lograr un grado de movilidad por tierra, mar y aire; el petróleo se forma bajo la superficie terrestre por la descomposición de restos de organismos minúsculos o plantas que crecen en los fondos marinos, y en menor medida, de organismos terrestres arrastrados al mar por los ríos, se mezclan con las finas arenas y limos que caen al fondo en las cuencas marinas tranquilas. Estos depósitos, ricos en materiales orgánicos, se convierten en rocas generadoras de crudo. El proceso comenzó hace muchos millones de años, cuando surgieron los organismos vivos en grandes cantidades, y continúa hasta el presente. Los sedimentos se van haciendo más espesos y se hunden en el suelo marino bajo su propio peso, a medida que se van acumulando depósitos adicionales, la presión sobre los situados más abajo se multiplica por varios miles, y la temperatura aumenta en varios cientos de grados, los carbonatos precipitados y los restos de caparazones se convierten en caliza, y los tejidos blandos de los organismos muertos se transforman en petróleo y gas natural.
El petróleo contiene elementos gaseosos, líquidos y sólidos. La consistencia del petróleo varía desde un líquido tan poco viscoso como la gasolina hasta un líquido tan espeso que apenas fluye; por lo general, hay pequeñas cantidades de compuestos gaseosos disueltos en el líquido. Cuando las cantidades de estos compuestos son mayores, el yacimiento de petróleo está asociado con un depósito de gas natural, que sale a la superficie junto con él cuando se perfora un pozo.

La perforación submarina es otro método para aumentar la producción de los campos petrolíferos (y uno de los logros más impresionantes de la ingeniería en las últimas décadas) con la construcción y empleo de equipos de perforación sobre el mar. Estos equipos de perforación se instalan, manejan y mantienen en una plataforma situada lejos de la costa, en aguas con una profundidad de hasta varios cientos de metros. La plataforma puede ser flotante o descansar sobre pilotes anclados en el fondo marino, y resistir a las olas, el viento y en las regiones árticas a los hielos. Con este método se han perforado con éxito pozos con una profundidad de más de 6.4 km desde la superficie del mar. La perforación submarina ha llevado a la explotación de una importante reserva adicional de petróleo.

La mayor parte del petróleo contiene una cantidad significativa de gas natural en disolución, que se mantiene disuelto debido a las altas presiones del depósito; cuando el petróleo pasa a la zona de baja presión del pozo, el gas deja de estar disuelto y empieza a expanderse. Esta expansión, junto con la dilución de la columna de petróleo, hace que éste aflore a la superficie. A medida que se continúa retirando líquido del yacimiento, la presión del mismo va disminuyendo poco a poco, así como la cantidad de gas disuelto. Esto hace que la velocidad de flujo del líquido hacia el pozo se haga menor y se libere menos gas, cuando el petróleo ya no llega a la superficie se hace necesario instalar una bomba en el pozo para continuar extrayendo el crudo. Sin embargo, hay pozos que proporcionan solamente gas natural.

Todos los tipos de petróleo se componen de hidrocarburos, aunque también suelen contener unos pocos compuestos de azufre y de oxígeno; el contenido de azufre varía. En algunos casos el contenido de H_2S es extremadamente alto. El gas de Lacq (en el sureste de Francia), por ejemplo, contiene 15% de H_2S, mientras que algunos gases de Canadá (Alberta y noreste de Columbia Británica contienen 30%[3] de H_2S; Y en los casos especiales donde altas cantidades de H_2S están presentes en el gas, una profunda remoción no es suficiente.

3.1.2 PROCESAMIENTO DEL GAS NATURAL

Una vez extraído el crudo, este fluye a la superficie acompañada de grandes cantidades de gas y agua. Antes de emplear el gas natural como combustible se extraen los hidrocarburos más pesados, como el butano y el propano, por tal motivo se trata con productos químicos y calor, así como también se hace pasar por baterías de separadores de alta presión para eliminar el agua y los elementos sólidos, y separar el gas natural. El gas natural además de hidrocarburos tiene N_2, CO_2 y H_2S, junto con muchas impurezas. Por lo cual, el gas requiere de tratamiento con un orden apropiado para sus variadas aplicaciones.

Su procesamiento consiste principalmente en:

- La eliminación de compuestos ácidos (H_2S y CO_2) mediante el uso de tecnologías que se basan en sistemas de absorción-agotamiento utilizando un solvente selectivo. El gas alimentado se denomina "amargo", el producto "gas dulce" y el proceso se conoce como "endulzamiento".
- La recuperación de etano e hidrocarburos licuables mediante procesos criogénicos, (uso de bajas temperaturas para la separación de un líquido por destilación fraccionada) previo proceso de deshidratación para evitar la formación de sólidos (hidratos).
- Recuperación del azufre de los gases ácidos que se generan durante el proceso de endulzamiento.
- Fraccionamiento de los hidrocarburos líquidos recuperados, obteniendo corrientes ricas en etano, propano, butanos y gasolina; en ocasiones también resulta conveniente separar el isobutano del n-butano para usos muy específicos.

En particular, si los gases ácidos no fueran tratados para recuperar el azufre, se envían al quemador de gas ácido y serán venteados a la atmósfera en forma de óxido de azufre. El Complejo Procesador de Gas de Nuevo Pemex, que Petróleos Mexicanos tiene instalado en el estado de Tabasco, ocupa una superficies de 464 hectáreas y se localiza en el municipio del centro en el estado de Tabasco a 35 km de la Ciudad de Villa Hermosa; y esta constituido por :

Dos Plantas Endulzadoras de Gas de 400 MMPCD (millones de pies cúbicos por día), Dos Plantas Recuperadoras de Azufre de 400 TON/D (toneladas por día de azufre), Cuatro Plantas Endulzadoras de Líquidos de 24 MBD (miles de barriles por día), Tres Plantas Criogénicas de 600 MMPCD, Dos Plantas Fraccionadoras de HC's (hidrocarburos), de 103 MBD. Figura 3.1.

El establecimiento de una planta recuperadora de azufre, se localiza cerca de otra u otras unidades endulzadoras, las cuales proporcionan la materia prima (H_2S). Esta planta tiene como objeto procesar gases ácidos, y así obtener azufre elemental.

En éstas plantas recuperadoras de azufre se obtenía una recuperación del 95% de azufre, lo cual esta por debajo de acuerdo con la NOM-137-SEMARNAT-2003.

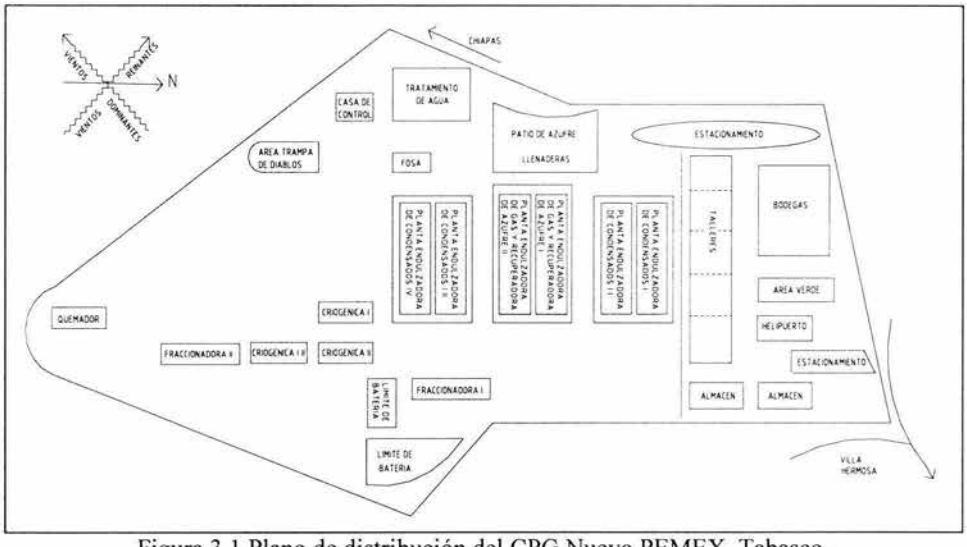


Figura 3.1 Plano de distribución del CPG Nuevo PEMEX, Tabasco.

3.1.3 EL PROCESO DE ENDULZAMIENTO

El proceso de endulzamiento para eliminar el gas ácido (principalmente CO_2 y H_2S). Fig.3.2, se efectúa en plantas Girbotol utilizando como absorbente una solución de aminas. Antes de entrar al proceso propiamente dicho, el gas natural se hace pasar por un tanque donde se recogen vapores de agua condensados al comprimir el gas. Estos condensados se envían a plantas endulzadoras (para separar los hidrocarburos), en tanto que el gas pasa a la torre absorbedora. Por la parte superior de la torre absorbedora entra la solución de amina, mientras que en contracorriente (por la parte inferior) asciende el gas natural. En el absorbedor se logra un contacto directo entre el gas y la solución absorbente de amina, con lo cual se consigue la eliminación casi total del ácido sulfhídrico y del anhídrido carbónico. Por el domo se obtiene gas dulce, éste gas es enviado a un tanque colector donde se recoge la amina que eventualmente puede ser arrastrada, la cual se regresa nuevamente al sistema, mientras que el gas dulce, se envía a plantas criogénicas para recuperar los licuables más valiosos, como etano, propano, butano y gasolinas naturales.

La amina que sale por el fondo del absorbedor rica en H_2S y CO_2, se envía a precalentarse intercambiando calor con los fondos de la torre regeneradora. En estas condiciones pasa a la parte superior de la torre regeneradora. A medida que la amina desciende de plato en plato, va regenerándose, hasta llegar al plato número uno, de donde pasa a un recalentador. El calentamiento provoca el desprendimiento de los gases ácidos, mismos que ascienden a través de la columna hasta el domo. De aquí pasa a un sistema de enfriamiento con agua, donde se condensa la amina que se recibe en un tanque colector, y esta regresa como reflujo a la torre

regeneradora, en tanto que los gases ácidos son enviados como materia prima a la planta recuperadora de azufre, donde el ácido sulfhídrico se convierte en azufre elemental. La amina ya regenerada que sale por el fondo de la torre, recibe el nombre de amina pobre (y es enviada como antes se dijo, a precalentar la amina rica que viene de la columna absobedora) la cual pasa enseguida a enfriarse en contracorriente con agua y posteriormente se filtra regresando a la torre absorbedora para cerrar el ciclo. Los gases ácidos obtenidos en la columna regeneradora, presentan una cantidad variable de ácido sulfhídrico y anhídrido carbónico.

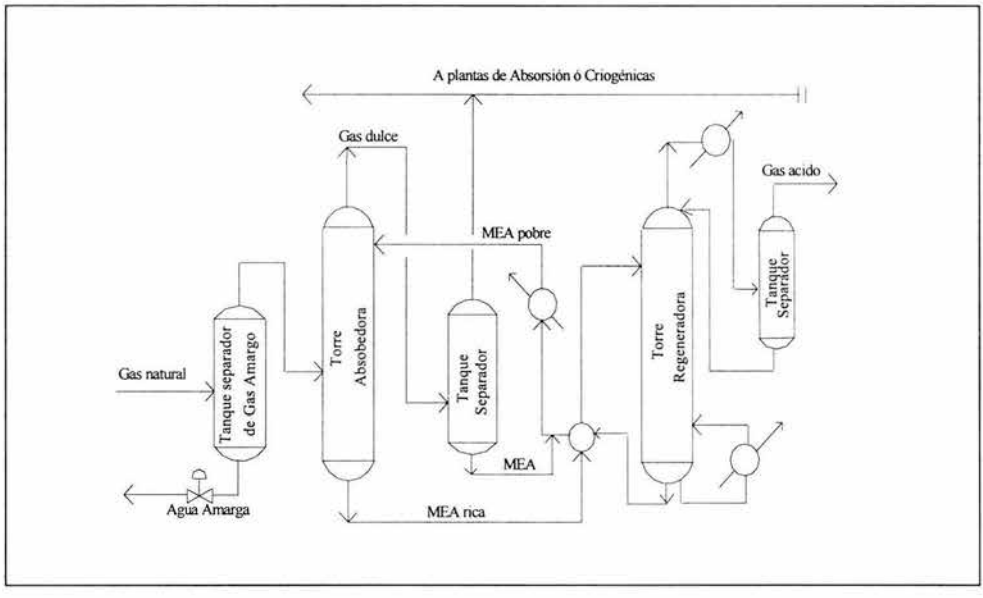


Figura 3.2 Proceso de Endulzamiento.

3.2 ANTECEDENTES DEL PROCESO CLAUS

Hasta 1970, el principal motivo para la recuperación de ácido sulfhídrico en los gases de refinería, era para usarlo como combustible junto con otros gases. Incluso en las refinerías con unidades de recuperación de azufre el rendimiento era del orden de 90 al 93%. En 1883 Carl Friedrich Claus encontró que pasando un flujo de ácido sulfhídrico y gas combustible a través de un tubo que contenía alumina convertía el altamente tóxico ácido sulfhídrico a inofensivo azufre elemental (El ácido es oxidado a azufre elemental y agua por el oxígeno presente en el gas caliente de combustión).

En el proceso original, la reacción Claus era realizada en un simple paso sobre un catalizador, en el cual se obtenían recuperaciones de 80–90%. Después se introdujo un sistema de enfriamiento dentro del lecho catalítico lo cual no fue muy efectivo; pero no fue hasta los treintas cuando la industria química alemana mejoró considerablemente el Proceso Claus original, al introducir un revolucionario desarrollo el cual aumentó considerablemente la eficiencia, y así mismo permitió recuperar en forma de vapor, el calor que se desechaba.
El proceso Claus ha sido ampliamente usado para recuperar el azufre elemental del H_2S en las corrientes de gas ácido. Recientemente, la mayor parte de las plantas Claus fueron consideradas de gran importancia, en la reducción de las emisiones de SO_2 a la atmósfera. Ahora, más plantas Claus son tomadas en cuenta como un mayor potencial para la calidad del aire. Este proceso es reconocido como muy confiable. Y la industria ha sido capaz de operar las plantas Claus con una atención relativamente pequeña, y con una gran cantidad de variaciones en la composición del gas de cola.

A pesar de la enorme experiencia acumulada en el diseño y operación de las plantas Claus, es difícil mantener el proceso con una gran eficiencia, pero esto se debe de realizar debido a que las autoridades ambientales en muchas partes del mundo han puesto restricciones en los limites de emisiones.

El proceso Claus trabaja de una forma adecuada con gases que contengan más del 20% (en volumen) de ácido sulfhídrico y menos del 5% de hidrocarburos. El proceso descrito por Chance y Claus en 1885, hoy todavía se emplea con algunas variaciones, dependiendo de las concentraciones de los compuestos mencionados, de esta forma se tienen dos maneras de trabajar la *Etapa térmica* (comienzo del tratamiento del gas ácido), dependiendo de las concentraciones del gas ácido:

Combustión con flujo directo: La combustión de flujo directo, es usada para gases ácidos con concentraciones de ácido sulfhídrico de 40% mol o más. Aquí todo el gas ácido pasa a través del reactor térmico y del recuperador de calor (Fig.3.3), pero solo una tercera parte del gas es transformada con la cantidad estequiométrica de oxígeno (aire), con lo cual una cantidad significante de azufre es producido en el horno, y removida por el recuperador de calor y el condensador antes de entrar al primer convertidor catalítico (en donde reacciona el dióxido de azufre con el ácido sulfhídrico no transformado para producir azufre elemental adicional). La cantidad de azufre recuperado en la etapa térmica, depende de la presión de vapor producida en el recuperador de calor, y de la temperatura del gas de salida del mismo.

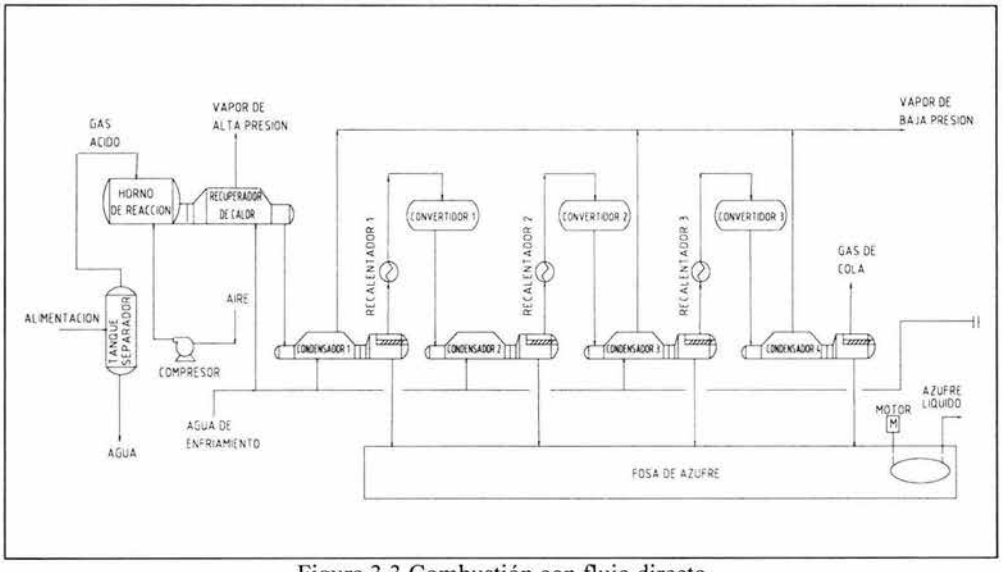


Figura 3.3 Combustión con flujo directo

Combustión con flujo dividido: Esta es utilizada para gases ácidos que contienen del 20-40% mol de ácido sulfhídrico, del cual una parte es alimentado directamente a la primer etapa catalítica, y el resto es transformado en el oxidador térmico, de igual forma que en la combustión con flujo directo. (Fig.3.4).

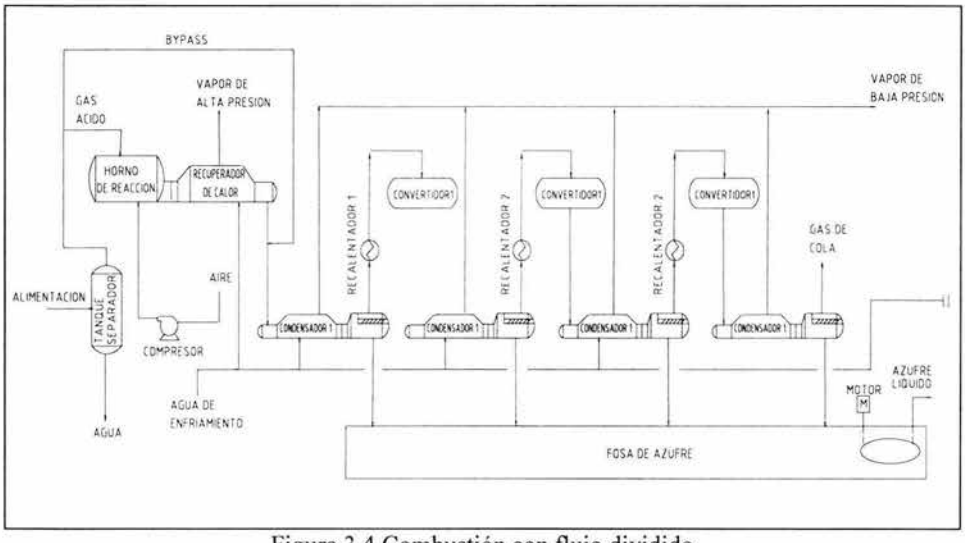


Figura 3.4 Combustión con flujo dividido

3.3 DESARROLLO DEL PROYECTO

Para desarrollar un proyecto se deben seguir diversos pasos lo cuales son:

3.3.1 PLANEACIÓN DEL PROYECTO

Consiste en establecer las acciones que se deben de seguir para la realización del proyecto, estableciendo la secuencia de actividades y los requisitos de información así como el alcance, costo y tiempo de ejecución. Dentro de esta etapa se realiza la asignación de contrato.

3.3.1.1 ASIGNACIÓN DE CONTRATO

Aquí se firma formalmente el contrato entre el contratista (firma de ingeniería) y el cliente (PEMEX). Y queda por escrito el periodo de ejecución, así como todas las cláusulas correspondientes por retraso o mala ejecución del proyecto, reembolsos y demás. En esta etapa se empiezan a formar los equipos de trabajo para las siguientes etapas.

3.3.2 INGENIERÍA DEL PROYECTO

En esta etapa se realizan todas las actividades básicas para la realización del proyecto, como son planos de todos y cada uno de las áreas involucradas (proceso, civil, mecánico,,,), cotizaciones, maquetas para finalmente llegar a la construcción.

3.3.2.1 INGENIERÍA BÁSICA

Consiste en la elaboración de los documentos técnicos básicos (bases de diseño, diagrama de flujo de proceso, descripción del proceso, balance de materia y energía, hojas de datos de equipo, diagrama de tubería e instrumentación, índice de servicios, lista de líneas, manual de operación) que son necesarios para llevar a cabo el proyecto, a partir de los cuales se realiza la Ingeniería de Detalle. En éste caso específico solamente se añadirá una nueva etapa más al proceso (igual que las anteriores), y simplemente se agrega esta etapa a todos los diagramas y documentos relacionados en esta fase.

3.3.2.2 HAZOP (PELIGRO Y PROBLEMAS DE OPERABILIDAD)

La palabra Hazop significa peligro y problemas de operabilidad. Fué inventada inicialmente en el reino unido, pero la técnica comenzó a ser utilizada más en la industria del proceso químico después del desastre de Flixborough en el cual una explosión química de la planta mató a veintiocho personas, muchas de las cuales eran cabezas de familia ordinarias que vivían cerca. Con el intercambio general de ideas y del personal, el sistema entonces fué adoptado por la industria petrolera, que tiene un potencial similar para los desastres importantes. Esto fué seguido por las industrias del alimento y de agua, donde se considera grande el potencial del peligro.

El Hazop es un análisis que se realiza para determinar los posibles riesgos de la planta y evitarlos. En este estudio se reúnen un grupo de expertos de diferentes especialidades, y así cada uno da sus puntos de vista; esto es más fácil a que cada uno trabaje por su cuenta. Se utiliza el método causa-efecto y efecto-causa, y se trabaja con los posibles cambios que pudieran tener las variables, como temperatura, presión, flujo,,,. Se basa también mucho en la experiencia de la personas que trabajan en este proyecto. Ya que este proceso ya se ha utilizado en otras partes (tal vez no con las mismas condiciones) y sus experiencias son de gran utilidad, en el análisis de riesgos. Se podría decir que la confiabilidad y la seguridad recaen en el Hazop.

En este proyecto el equipo y el personal puede ser objeto de alguno de los siguientes peligros:

- Altas presiones
- Altas temperatura
- Gases tóxicos de proceso
- Vapores explosivos

- Flamas abiertas
- Gases corrosivos

Además se deben de tener cuatro consideraciones importantes en la operación general de la planta, especialmente durante operaciones irregulares en el arranque y paro, las cuales son: protección del personal, equipo, catalizador y del ambiente.

Protección del personal: Lo más importante es la seguridad del personal. Aunque las corrientes del proceso tienen muy bajas presiones (generalmente no más grandes que 80 kPas (12psi), y temperaturas usualmente calientes (130°c a 350°c (250 a 650°F)) además que contienen gases venenosos. Los peligros de explosión por los dos gases más tóxicos H_2S y SO_2 son conocidos. Sin embargo aunque el dióxido de azufre es un gas sofocante, a bajas concentraciones solamente irrita, y las personas se alejaran del área antes de que ningún problema se presente. En general, el H_2S y SO_2 están lo suficientemente diluidos a la salida del horno principal que no existe ningún peligro real por las personas de operación y mantenimiento, particularmente cuando usan el sentido común. Por ello es importante respetar, pero no tenerle miedo, a los peligros de estos compuestos. En todo momento cuando se trabaja en la planta se debe conocer las rutas de escape, la dirección de los vientos, donde conseguir ayuda, donde están localizados los aparatos de respiración y saber los primeros auxilios.

Protección del equipo: Aunque en el horno de reacción el cuidado que se debe tener es en base a la composición del gas y a la estrategia de la combustión, se deben tener altas temperaturas por algún tiempo, en base a la experiencia. Además un material refractario debe ser incluido para proteger el material de los recipientes al final de las tuberías y en los tubos de coraza de los intercambiadores. La protección de corrosión y prevención de daños por sobrecalentamientos o sobrepresiones, es por supuesto considerado desde el diseño, pero el cuidado en la operación y en la inspección periódica de equipos (particularmente por penetración débido a la corrosión), pueden prevenir problemas más serios de los que pudieran pasar.

Protección del catalizador: La prevención de daños al catalizador, es tanto por problemas de diseño como por operación. En las etapas de diseño, la selección del mejor método de recalentamiento mejora básicamente la protección. En la operación la mejor protección del catalizador es una continúa operación con una alimentación estable que es libre de agentes desactivantes. Los mayores daños del catalizador ocurren durante el arranque y/o paro, por la naturaleza irregular de operación y la posibilidad de ingreso de agentes desactivantes tales como O_2.

Protección del ambiente: La minimización de emisiones a la atmósfera ha logrado más significación en años recientes. Durante los arranques y paros es cuando se debe de cuidar las emisiones excesivas, que pueden ser minimizadas con cuidado y con una apropiada acción.

3.3.2.3 INGENIERÍA DE DETALLE

Durante el desarrollo de la Ingeniería de Detalle se elaboran todas las especificaciones de los equipos y materiales para llevar a cabo la construcción. Esta integrada de planos y especificaciones de todas las áreas involucradas en el Proyecto: civil, tuberías, eléctrico, mecánico, instrumentación, telecomunicaciones, seguridad industrial, arquitectura,,,.

3.3.2.4 MAQUETA ELECTRÓNICA

En esta etapa se revisa la maqueta de la planta electrónica, con lo que se pueden realizar correcciones más precisas y más rápidas. En ella se da el visto bueno para la construcción.

3.3.2.5 INGENIERÍA APROBADA

A partir de los todos los documentos generados en las anteriores etapas, y una vez que se da el visto bueno de todos los materiales que se van a utilizar para la realización del proyecto, se procede a la adquisición de equipo y materiales necesarios para la construcción. Se elaboran solicitudes de cotizaciones, se realiza la inspección y expeditación.

3.3.3 OPERACIÓN DE LA PLANTA

En esta última fase es donde se lleva a cabo la realización del proyecto, ya que se hace la construcción, prueba, arranque, prueba de desempeño, cierre de contrato y entrega a área operativa.

3.3.3.1 CONSTRUCCIÓN

Esta parte es la realización física del proyecto, para ello se parte de los documentos desarrollados en las etapas anteriores. Aquí más que nada se refiere al montaje de los nuevos equipos que se van a adicionar a la planta. En el cual están involucradas todas las áreas, ya que cada una tiene que supervisar que se realice la construcción en base a los planos y especificaciones establecidas anteriormente.

3.3.3.2 PRUEBA

Una vez que se a terminado la construcción, se procede a la prueba para detectar posibles fallas en los equipos, y repararlas lo más pronto posible. Las razones más importantes para las pruebas son:

- Garantizar que las regulaciones ambientales son satisfactorias.
- Garantizar el conocimiento de las garantías del contratista.
- Evaluación de las modificaciones de la planta.
- Evaluación de los cambios de operación, dirigidos a la optimización.

- Monitoreo de la utilización de la planta para un diagnostico de problemas.
- Manejo del catalizador.
- Compilación del balance de materia y energía para la evaluación de la utilización de equipos.
- Obtener datos para futuras plantas.

El tiempo requerido para la estabilización de las condiciones de la planta depende del tipo y magnitudes de los cambios, y del tamaño de los equipos de reacción. Por supuesto, que durante la prueba, todos los flujos operativos, temperaturas y presiones son monitoreados y registrados en intervalos regulares.

3.3.3.3 ARRANQUE

Una vez que se han concluido las pruebas, se han corregido posibles fallas, y se sabe que todos los equipos, detectores, tuberías y demás funcionan correctamente. Se realiza el arranque de la planta, para ver que todo puede operar conjuntamente. Para lo cual se debe de integrar el equipo de arranque con personal operativo, de mantenimiento, de ingeniería, de construcción y de seguridad industrial, el cual elabora el programa de pruebas requerido.

Procedimiento de Arranque:

1. Apertura y cierre de válvulas.
2. Abrir gas de combustión al incinerador y arranque.
3. Abrir gas de combustión al reactor térmico y arrancar.
4. Ajuste de "scanners" de flama por DURAG.
5. Calentamiento de la unidad.
6. Abrir gas ácido en limites de bateria.
7. Introducir gas ácido.
8. Seguir procedimiento según manual de operación.

3.3.3.4 PRUEBA DE DESEMPEÑO

En esta prueba se realizan corridas de la planta, una vez estabilizada la operación por un periodo previo de cuando menos 24hrs, para saber que realmente las garantías estipuladas se cumplen. Durante esta prueba se tomarán registros actuales de la alimentación de gas ácido, análisis de gas ácido, gas de cola, gas de chimenea y cantidades producidas de azufre por un periodo de 24 horas.

Guía de operación:

Las líneas de escurrimiento y los sellos de azufre líquido deberán estar limpios y libres de materia extraña, de tal forma que el azufre obtenido fluya libremente hacia la fosa de desgasificación.

Los tubos de transferencia de calor de los condensadores de azufre deberán estar limpios y libres de toda incrustación, corrosión y/o taponamiento. De igual forma los eliminadores de niebla de la planta.
Los recalentadores de proceso de las etapas 1 y 2 Claus deberán estar en automático y ser ajustados de tal forma que la temperatura del gas de proceso entre a los reactores a 230 y 205°c (aproximadamente) respectivamente.
Antes de empezar el período de prueba, el grupo de arranque deberá ser previsto con tiempo suficiente para inspeccionar las condiciones de la planta y deberá recomendar los ajustes necesarios.
Programación de la prueba de comportamiento:
La operación de la planta antes, durante y después de la prueba de comportamiento será realizada bajo el cuidado, custodia y control de PEMEX, quien ejercerá el control operativo en todos los aspectos de seguridad y sostendrá el riesgo total de pérdida.
Si en un breve periodo que no exceda a 1 hora durante la prueba de comportamiento la operación de la planta es inestable y fuera de las especificaciones, y después se restablece su operación, la prueba de comportamiento podrá continuar durante 24 horas de operación estable, siempre y cuando exista mutuo acuerdo entre las partes. Aquellas muestras y la información de operación tomadas durante el tiempo en que la planta operaba por encima de las especificaciones deberán ser eliminadas.

Retrasos e interrupciones:
En caso de retrasos e interrupciones las partes acordarán si los representantes del contratista se quedan, o no en el complejo y si no, las fechas en que deban regresar.
Después de cualquier retrase, el grupo de arranque deberá ser previsto con tiempo suficiente para inspeccionar las condiciones de la planta y deberán recomendar los ajustes necesarios.
Si un periodo de la prueba fuera interrumpido o afectado por causas ajenas al control del contratista, se deberá efectuar un nuevo periodo.

Muestreo y análisis:
Los análisis de gas de alimentación y las corrientes de producto requeridas para determinar si el proceso está cumpliendo con las garantías se enlistan a continuación.

Hora	Análisis de la corriente de
06:00	Gas ácido – Gas de cola
10:00	Gas ácido – Gas de cola – Gas chimenea
14:00	Gas ácido – Gas de cola – Gas chimenea
18:00	Gas ácido – Gas de cola – Gas chimenea
22:00	Gas ácido – Gas de cola
02:00	Gas ácido – Gas de cola

Tabla 3.1. Análisis de las SRU's.

Los análisis se realizaran por medio de un cromatógrafo de gases.

Los resultados de los análisis de el aire de combustión y del gas combustible deberán estar disponibles para el control de la unidad, preferiblemente dentro de las dos primeras horas y a más tardar después de cuatro horas de haber tomado las muestras concernientes. El resultado de los análisis de la alimentación, de gas ácido y del gas de cola deben estar disponibles dentro de las dos primeras horas después de haberse tomado las muestras, PEMEX presentara el registro que muestre los datos sobre todos los puntos pertinentes, incluyendo los análisis de las alimentación de gas ácido y la operación de la planta, desde la fecha de arranque hasta la fecha de la prueba de comportamiento.
Los análisis deberán ser conducidos por PEMEX y pueden ser observados o atestiguados por el contratista, en caso de desacuerdo se puede seleccionar otro laboratorio (con la aprobación de ambas partes) para solucionar el asunto, los costos de todas las pruebas y análisis serán sufragados por PEMEX.

El contratista garantiza que las plantas deberán recuperar el 98.5% del azufre contenido en el gas ácido de alimentación sujeto a que la alimentación de gas cumpla con las características definidas por él.

Fallo en el cumplimiento de la prueba de comportamiento:
Si la planta fallara en el cumplimiento de las garantías durante la primera prueba de desempeño completa o si la prueba se detuviera porque PEMEX y el contratista consideraran obvio que dicha prueba no puede llegar a una conclusión exitosa el contratista tendrá que detener la prueba, hasta realizar las revisiones de diseño para llevar a cabo las medidas correctivas, para poner en marcha una segunda prueba de desempeño.
Si por cualquier razón atribuible a PEMEX como son volumen o calidad de alimentación la planta no aprueba la prueba, el contratista podrá afirmar que el comportamiento de la planta es

conforme a lo garantizado para las condiciones del periodo de prueba, por lo tanto las garantías serán consideradas como cumplidas.

3.3.3.5 CIERRE DE CONTRATO

Una vez puesta en marcha la planta y, quedando todas las garantías debidamente acordadas se cierra el contrato, dando el contratista por terminado el proyecto.

3.3.3.6 ENTREGA A ÁREA OPERATIVA

En esta última etapa el cliente da por terminado el proyecto, entregando formalmente la planta a el área operativa.

Ya que este trabajo se enfoca en el proceso de gas de cola Superclaus, para lograr la recuperación de azufre; solamente se realizara la descripción del proceso, el diagrama de flujo de proceso y el balance de materia, en cuanto a la parte de la Ingeniería Básica. Y la prueba de desempeño en cuanto a la operación de la planta, ya que en esta prueba se verifica la recuperación real de la planta, así como las condiciones reales de operación.

Por lo cual a continuación se realiza un análisis comparativo de los diferentes tratamientos de gas de cola, para determinar cual es el proceso que más conviene utilizar en la Planta Recuperadora de Azufre.

[3] Enciclopedia Industrial Química Ullmann's. Vol.. A25, 4ª edic, Frankfurt/Main, Federal Republic of Germany, 1984. Pág 514.

4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DE GAS DE COLA

Petróleos Mexicanos (PEMEX), a través de Pemex Gas y Petroquímica Básica (PGPB), haciendo un esfuerzo para reducir la emisión de contaminantes a la atmósfera, incluye en sus operaciones de procesamiento de gas, la recuperación del azufre. Por varios años, PGPB ha utilizado con este propósito, plantas Claus que le han permitido reducir dichas emisiones en porcentajes que varían entre las diferentes plantas.

Sin embargo, las restricciones ambientales a nivel mundial con respecto a la emisión de azufre se han vuelto más estrictas cada día. Aunque dichas restricciones varían de país a país, la tendencia generalizada es lograr mayores recuperaciones de las que se pueden lograr a través del proceso Claus.

Las recuperaciones de azufre deben ser de 97.5% para plantas que tienen una concentración >20% H_2S en el gas ácido, de 90.8% para una concentraciones de 10–20 % y de 74% para concentraciones <10%. Como la reacción en el proceso Claus no es completa, estas recuperaciones, serían imposibles de alcanzar sin ayuda de una unidad de tratamiento de gas de cola (TGCU), esta unidad ha sido desarrollado para limpiar el gas de cola (gas de salida del proceso Claus) de las plantas Claus. Con la llegada del sistema TGCU, muchos procesos están mejorando y con ello un mayor control se tendrá en el futuro.

Después de que la EPA realizo la promulgación para disminuir los niveles de emisiones contaminantes de SO_2 liberadas a la atmósfera, se hace necesario recuperar más azufre para cumplir con los lineamientos. Ello requiere generalmente procesos con unidad Claus en dos etapas o una unidad de oxidación directa como primera etapa, seguida de una segunda etapa tal como un proceso Sulfreen. Con estas combinaciones pueden obtenerse recuperaciones superiores al 98%.

Cuando se requieren recuperaciones mayores de 99.8% de azufre, varias tecnologías de algún tipo de tratamiento de gas de cola, pueden ser añadidas a los procesos Claus para lograrlo. Estas tecnologías recuperan el azufre remanente como H_2S para regresarlo a la planta Claus, ó como azufre elemental. Entre ellas se encuentran los procesos de absorción con aminas, los procesos con temperaturas por debajo del punto de rocío y los procesos de oxidación selectiva.

4.1 POR DEBAJO DEL PUNTO DE ROCIO

La recuperación de azufre con el Proceso modificado Claus es limitada por la temperatura de operación en la etapa catalítica. A menor temperatura se logra una alta recuperación. Sin embargo, la operación de reactores Claus a bajas temperaturas, involucra una adsorción del azufre en el catalizador, el cual tiene después que ser regenerado. Los procesos por debajo del punto de rocío tienen un equilibrio favorable a bajas temperaturas. Estos procesos pueden ser simplemente descritos como una extensión del Claus; el cual consiste en la instalación de un reactor Claus operando a temperaturas, lo suficientemente bajas como para permitir la condensación del azufre en el sistema de reacción, mismo que se deposita en las paredes de los poros del catalizador, disminuyendo su actividad, por lo que se requiere contar con una etapa posterior de regeneración. Todos estos son procesos cíclicos. El catalizador adsorbe el azufre producido en la etapa catalítica, el cual es regenerado antes de llegar a una significante desactivación. Los procesos empezaron a utilizarse alrededor de 1970, donde la recuperación máxima que se tenía con el Claus modificado más el proceso por debajo del punto de roció era de 98.7–99.2 %; y a mitad de 1990 se lograron recuperaciones de 99.0–99.9 %.
Los mejores procesos por debajo de la temperatura del punto rocío que tienen mayor aplicación comercial son el CBA (Cold Bed Absorption), MCRC (Maximum Claus Recovery Concept) y Sulfreen.

Estos procesos de gas de cola trabajan sobre un catalizador, y cuando el lecho esta saturado de azufre, se regenera (vaporizando el azufre). La diferencia entre ellos es principalmente la estrategia de regeneración.

Comúnmente en todos estos procesos el catalizador, no solamente actúa como "convertidor" de la reacción Claus, sino así mismo adsorbe el azufre producido con la finalidad de recuperar el azufre elemental. Con la condensación del azufre se reduce la presión parcial del mismo y el H_2S y SO_2 remanente continúan reaccionando hasta llegar nuevamente al equilibrio.

4.1.1 MCRC

El proceso MCRC (Concepto Máximo de Recuperación de Azufre) tiene licencia otorgada por la compañía Delta Proyects (Canáda); y la primer planta Claus operada con éste sistema fue en 1980. El proceso MCRC logra eficientes recuperaciones de azufre del 99% o más. Este proceso también es diseñado con tres o cuatro convertidores catalíticos. Cuando la reacción se efectúa y el azufre es adsorbido en el catalizador, éste se desactiva y requiere una regeneración periódica o desorción (vaporización del azufre). Esto se logra enviando un flujo cargado de vapor de la planta de azufre a la línea de proceso; por esto no es necesario tener un convertidor fuera de la línea de proceso en regeneración, como en el caso de otros procesos por debajo del punto de rocío.
La descripción de este proceso se muestra en la figura 4.1, donde la corriente que sale del Condensador 2 y que procede de la etapa Claus es calentada, y posteriormente introducida en

el Convertidor 2 (el cual se encuentra en modo de regeneración) para regenerar el lecho catalítico. El azufre que es desorbido y vaporizado abandona el convertidor con la corriente de gas de regeneración, la cual entra al Condensador 3, donde es condensado y separado. El vapor de salida del Condensador 3, entra al Convertidor 3 donde tiene lugar la primer etapa de conversión (debajo del punto de rocío), donde más azufre es producido y adsorbido en el catalizador, posteriormente el gas remanente abandona el convertidor, y es condensado y separado en el Condensador 4. El vapor descargado en este condensador, entra al Convertidor 4 donde ocurre la segunda etapa de conversión (debajo del punto de rocío). Virtualmente todo el azufre producido es adsorbido en el catalizador, y la corriente de salida del Condensador 5 es enviada al incinerador del gas de cola.

Cuando el catalizador del Convertidor 4 tiene una carga considerable de azufre, y el catalizador del Convertidor 2 ha sido regenerado, la posición de los convertidores cambia sucesivamente, colocando el convertidor que se encontraba en el modo de regeneración en la posición del convertidor 3, y el que se encontraba en ésta posición cambia a la del convertidor 4, y el que se encontraba en ésta posición pasa al modo de regeneración, y de esta manera continua el proceso.

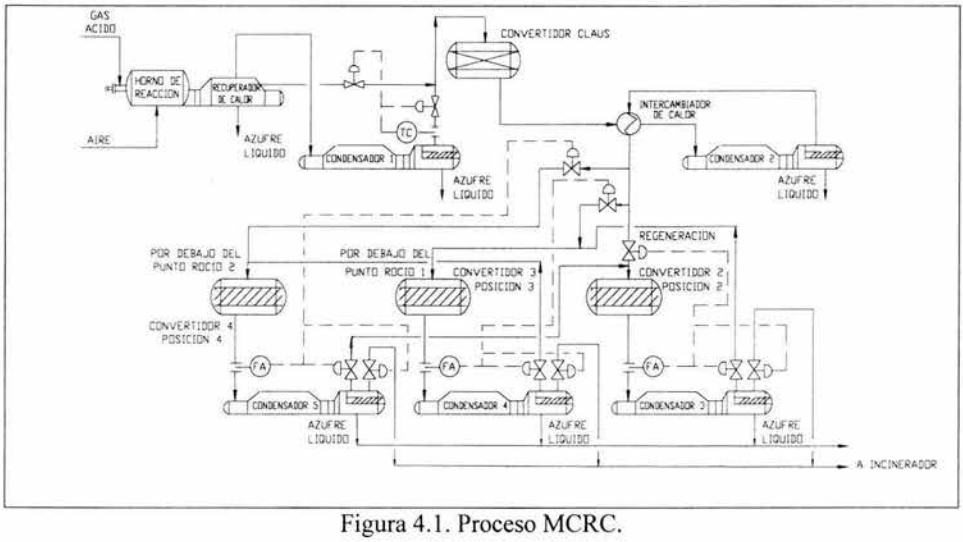


Figura 4.1. Proceso MCRC.

4.1.2 SULFREEN

El proceso Sulfreen fue desarrollado por la firma alemana Lurgi y la francésa Elf Aquitaine. La primer planta puesta en marcha fue en 1970 en Francia, y para 1993 más de 40 estaban construidas. El proceso esta basado en una extensión del proceso Claus, donde el residual H_2S

y SO_2 del gas de cola Claus reaccionan en el lecho fijo catalítico, el cual es alumina activada con propiedades semejantes a las del catalizador Claus. El gas de cola de la planta Claus se introduce en fase gas, a la temperatura que abandona la etapa Claus, a través de uno de los dos reactores, donde por medio del catalizador, más H_2S y SO_2 es convertido a azufre elemental y adsorbido en el catalizador. Con la regeneración del catalizador, se recupera el vapor de azufre y posteriormente se condensa. Inicialmente carbón activado especial era utilizado pero ahora el proceso opera con alumina, el cual tiene una temperatura de regeneración de 300°c. Una vez que ha sido regenerado el catalizador, el reactor ya esta listo para ser cambiado al modo de adsorción. A bajas temperaturas (125-150°c) la conversión de equilibrio de H_2S y SO_2 es casi completa y una recuperación de azufre del 99.5% ó mas puede ser lograda. La adsorción y regeneración requieren un largo periodo de tiempo, por lo cual dos reactores son utilizados para adsorción y uno para regeneración. Figura 4.2.

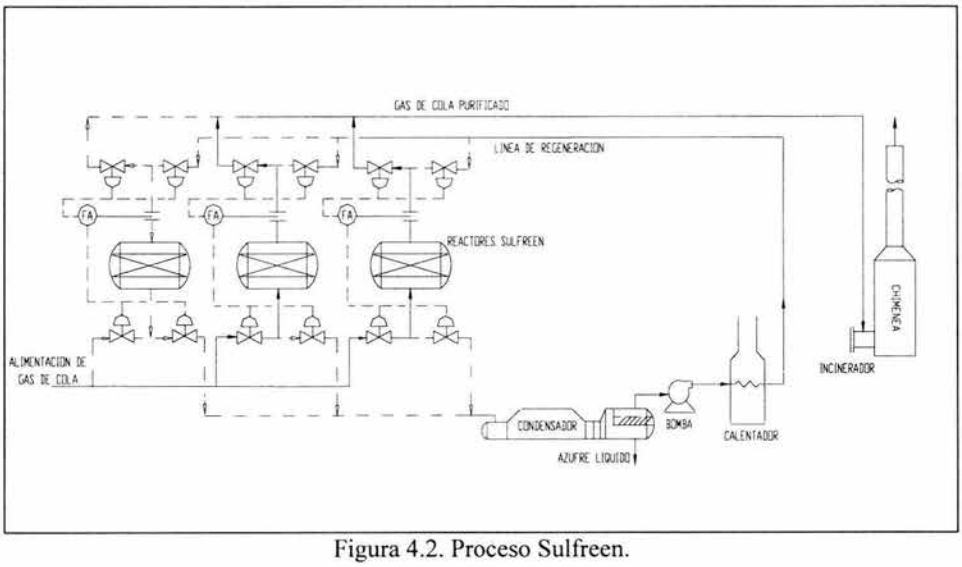


Figura 4.2. Proceso Sulfreen.

Si altas concentraciones de COS y CS_2, se encuentran presentes en el gas de cola, una versión modificada llamada Hydrosulfreen puede ser utilizada, el cual incluye un pretratamiento de hidrólisis/oxidación.

4.1.3 CBA

El proceso CBA (Absorción en Lecho Frío) fue patentado por la Compañía Amoco (USA); aunque la primera instalación comercial puesta en marcha fue en 1976 en Alberta Canáda, y para 1993 aproximadamente 22 procesos estaban en marcha. Este proceso ofrece una viable solución para recuperaciones de 98-99.5 % necesarias para los requerimientos de regulaciones

que se conocen en muchas partes del mundo. El proceso es logrado con dos o más reactores catalíticos CBA; uno se usa a bajas temperaturas para la reacción de formación de azufre, con adsorción de azufre en el catalizador, mientras que el otro esta siendo regenerado. La regeneración se lleva a cabo por medio del paso de una corriente de gas caliente, a través del reactor (para calentar el catalizador) y así desorber y vaporizar el azufre. Después de la regeneración, el reactor CBA tiene que ser enfriado por medio de una corriente de gas frío. Cuando el catalizador ha sido adecuadamente enfriado pasa al modo de adsorción. Este proceso es casi igual al Sulfreen. Mientras que en el Sulfreen se pasa un flujo de gas libre de azufre a través del reactor durante la regeneración, el CBA utiliza una corriente caliente del reactor Claus para la regeneración. Figura 4.3. Con Procesos discontinuos como el Sulfreen y el CBA los costos de inversión son altos.

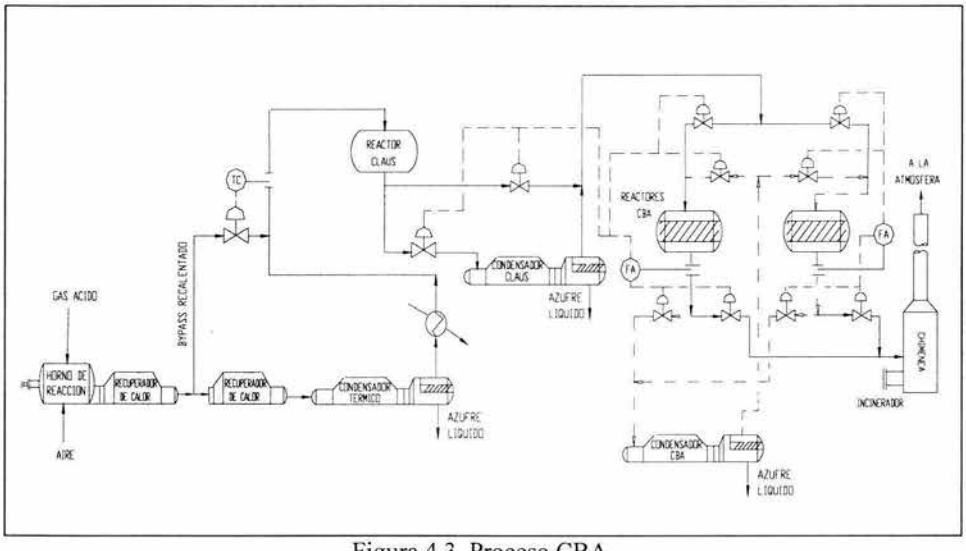


Figura 4.3. Proceso CBA.

El Proceso Clintox es un tratamiento físico para remover el SO_2 del gas de cola del incinerador Claus, el cual realiza una recuperación de SO_2 y lo regresa a la unidad Claus, la eficiencia se incrementa cuando la concentración del SO_2 se eleva en el gas de cola, así una combinación del Claus más una unidad Clintox da recuperaciones altas de 99.99%, con emisiones por debajo de 100ppm de azufre total, y los costos de inversión comparados con los procesos convencionales son iguales; el sistema trabaja de la siguiente forma: el gas de cola es enfriado antes de pasar en contacto directo con el solvente, el SO_2 es adsorbido en el reactor donde el gas purificado es venteado a la atmósfera, el solvente rico en SO_2 es precalentado y posteriormente pasa a la columna de regeneración, el concentrado SO_2 que abandona el regenerador es enfriado y reciclado a la planta Claus.

4.2 ABSORCIÓN CON AMINAS

Con respecto a los procesos de absorción con aminas, el proceso analizado por PGPB por considerarlo el más comercial, es el **SCOT** (Tratamiento de Gas Claus con Torres) el cual fue introducido en 1970 como un atractivo proceso. Esta basado en la recuperación del H_2S residual contenido en los gases de cola mediante la absorción con aminas, y su posterior agotamiento, para ser recirculado al tren Claus convencional, en este proceso casi todos los compuestos de azufre que abandonan la unidad Claus son convertidos a H_2S. En el proceso SCOT el gas de cola es calentado en un quemador, al mismo tiempo que se produce un gas de reducción (para hidrogenar todos los compuestos de azufre), de esta forma el gas caliente fluye a través de un lecho catalítico (reactor SCOT), donde casi todos los compuestos de azufre (como por ejemplo, el SO_2, COS (sulfuro de carbonilo), CS_2 (disulfuro de carbono) y azufre elemental) que abandonan la unidad Claus son convertidos a H_2S en un hidrotratamiento catalítico (Co-Mo o Ni-Mo) a 280-300°c, después la corriente que sale del reactor conteniendo el H_2S es enfriada en dos etapas, la primera en un recuperador de calor produciendo vapor de baja presión y la segunda en una torre de enfriamiento, en donde más agua del gas es condensada y tratada como agua amarga, después el gas frío pasa a la torre de absorción con aminas la cual es altamente selectiva del H_2S ante la presencia del dióxido de carbono (si las concentraciones de CO_2 hacen conveniente su separación. De lo contrario, se utiliza un solvente no selectivo, como el di-isopropanalamina(DIPA)), el vapor generado en la torre de absorción es enviado al incinerador. Mientras tanto la amina pasa a la torre de regeneración, (esto se lleva a cabo con vapor). El gas ácido concentrado abandona la torre por la parte superior, de esta manera se regresa a la planta Claus. Fig.4.4.

El proceso SCOT puede lograr niveles de emisiones de 250 ppmv o menos de SO_2 de los gases que son escapados por la chimenea. Los procesos Sulfreen, y CBA no pueden lograr niveles más bajos de emisiones, con resultados de 1500 a 2000 ppmv de SO_2, lo cual es lo más representativo de éstos procesos; si los gases de cola de las SRU contienen menos del 20-40 % de CO_2, el proceso SCOT debe ser seleccionado en base a menor inversión, menor utilidad, y gran comercialización; además el equipo que se utiliza es común a las plantas y refinerías con un mínimo de atención de operación. Con este tipo de tecnología se llegan a alcanzar niveles de recuperación del orden del 99.8 al 99.9%.

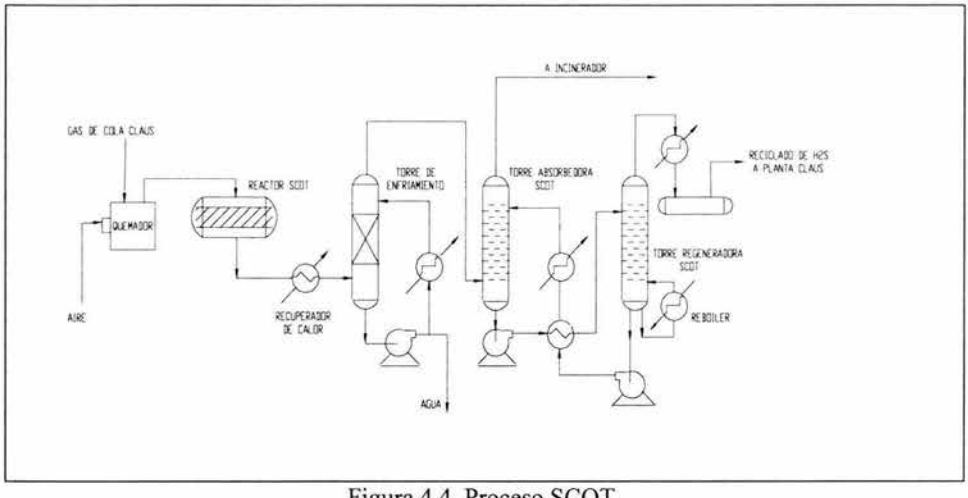


Figura 4.4. Proceso SCOT.

Un proceso análogo es el *Stretford*. Este proceso realiza también un paso de hidrogenación, en el gas de reducción que es obtenido en un quemador (el cual opera con exceso de combustible), y pasa junto con el gas de cola a través de un lecho fijo que contiene un catalizador especial de Co-Mo. En contraste con el proceso SCOT, el flujo hidrogenado contiene además de H_2S un poco de COS el cual es alimentado al reactor Stretford. El ácido sulfhídrico se absorbe en una solución de quinona que puede contener metavanadato sódico para acelerar las reacciones de oxidación. De acuerdo con el proceso Stretford, el H_2S es oxidado a S elemental e hidroquinona en una solución acuosa con oxígeno del aire, para oxidar la hidroquinona nuevamente a la quinona original (para su reutilización como catalizador). La solución se filtra o centrifuga para eliminar el azufre. Este proceso puede reducir el contenido de ácido sulfhídrico de los gases de salida a menos de una parte por millón. El azufre producido se elimina del líquido por filtración, centrifugación o flotación. Este proceso es económico sólo para las corrientes de gas que contengan menos del 2% de ácido sulfhídrico.

4.3 OXIDACIÓN SELECTIVA

Un proceso de oxidación selectiva es el BSR-SELECTOX el cual oxida el H_2S presente a azufre elemental; este proceso utiliza un catalizador especial que contiene óxido de vanadio para la reducción del SO_2 a H_2S, e hidroliza así mismo el CS_2 a H_2S y CO_2. Se dice que en la oxidación catalítica del H_2S a S elemental y SO_2 también hay alguna formación de SO_3.

4.3.1 SUPERCLAUS

El proceso Superclaus, fue patentado por Stork Comprimo; utiliza un catalizador recientemente desarrollado para oxidar selectivamente el H_2S restante del gas de cola, por lo que el azufre no resulta afectado y cuando se enfría, este se condensa en su forma líquida lo que facilita su recuperación. La modificación con Superclaus incrementa la recuperación de azufre hasta un 99%.
Este proceso de oxidación selectiva convierte el H_2S remanente en azufre elemental, mediante la oxidación selectiva con aire en un proceso catalítico, evitando la formación de SO_2.

El gas ácido quemado en la etapa térmica tiene que ser manejado de manera que el gas de cola, que entre en la etapa de oxidación selectiva (etapa Superclaus) contenga 0.8–1.5 %mol de H_2S. En la etapa Superclaus, el gas que abandona el condensador en la última etapa Claus es recalentado y mezclado con aire antes de entrar al reactor Superclaus. (Fig.4.5). Aquí ocurre la reacción esencial de oxidación.

$$H_2S + 1/2O_2 \longrightarrow 1/nS_n + H_2O$$

El proceso Superclaus es considerado de suma importancia, para aumentar la eficiencia de recuperación del proceso Claus. Además se integrada completamente a éste proceso debido a que es como otra unidad Claus, por esta razón no es considerado como una unidad separada de tratamiento del gas de cola Claus.

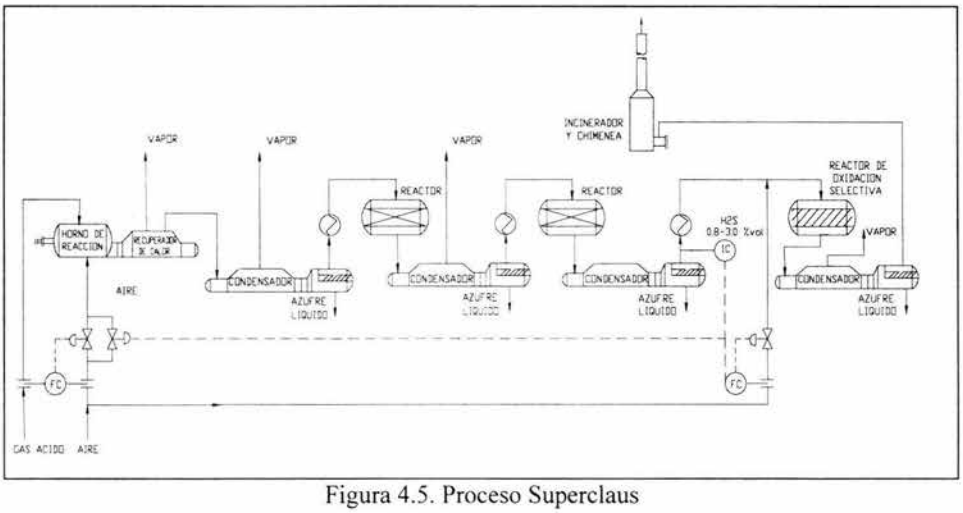


Figura 4.5. Proceso Superclaus

4.4 ANALISIS COMPARATIVO

Proceso	Ventajas	Desventajas
MCRC	➢ Recuperación de azufre del 99% ó más. ➢ Se utiliza la línea de proceso para la regeneración. ➢ Se obtiene azufre líquido.	➢ Utiliza tres o cuatro convertidores catalíticos. ➢ El gas de cola se requiere calentar, antes de entrar a este proceso. ➢ El catalizador requiere regeneración. ➢ Requiere demasiadas válvulas para la regeneración. ➢ Mayores costos operativos, debido al número de equipos.
SULFREEN	➢ Recuperación de azufre del 99.5% ó más. ➢ El gas de cola entra directamente al reactor. ➢ Catalizador similar al proceso Claus. ➢ Para la regeneración se utiliza una corriente de salida, del condensador. ➢ Se obtiene azufre líquido.	➢ Utiliza seis convertidores catalíticos. ➢ El catalizador requiere regeneración. ➢ Utiliza un gran número de válvulas para la regeneración. ➢ Se tiene que utilizar un calentador especial, para la regeneración. ➢ Si existen altas concentraciones de COS y CS_2, se tiene que aplicar un pretratamiento.

Proceso	Ventajas	Desventajas
		➢ Mayores costos operativos, debido al número de equipos.
CBA	➢ Recuperación de azufre de 98-99.5 %. ➢ El gas de cola entra directamente al reactor. ➢ Utiliza mínimo dos convertidores catalíticos. ➢ Se utiliza la línea de proceso para la regeneración. ➢ Se obtiene azufre líquido. ➢ Menores costos operativos, debido a que no hay un gran número de equipos.	➢ El catalizador requiere regeneración. ➢ Utiliza un gran número de válvulas para la regeneración.
SCOT	➢ Recuperación de azufre de 99.8-99.9 %. ➢ No requiere válvulas para la desorción. ➢ Menores costos operativos, debido a que no existe una gran instrumentación.	➢ Se utiliza para gases de cola de gas ácido con menos del 20-40 % de CO_2. ➢ Realiza una hidrogenación para transformar todos los compuestos de azufre (gas de cola) en H_2S, y regresarlo a la planta Claus. ➢ La amina requiere de una desorción (regeneración). ➢ Utiliza un catalizador especial.

Proceso	Ventajas	Desventajas
SUPERCLAUS	➢ Recuperación de azufre del 98.5-99.5 %. ➢ Utiliza un convertidor catalítico. ➢ El catalizador no requiere regeneración. ➢ No requiere válvulas la regeneración. ➢ Proceso muy similar al de las plantas Claus. ➢ Se obtiene azufre líquido. ➢ Menores costos operativos, debido a que no existe una gran instrumentación.	➢ Se utiliza para gases de cola de gas ácido con una concentración de H_2S de 0.8-1.5 %mol. ➢ Utiliza una corriente de aire

Tabla 4.1. Características de los Tratamientos de Gas de Cola.

En los Tratamientos por Debajo del Punto de Roció (Sulfreen, MCRC y CBA) y de Absorción con Aminas, para obtener el azufre elemental se tiene que realizar una regeneración del lecho, por las temperaturas a las que se trabaja, lo cual causa un mayor numero de tubería y equipo a utilizar.
En cambio en el proceso Superclaus (oxidación selectiva) el azufre se obtiene directamente, solamente se debe tener cuidado en las temperaturas de operación, ya que si son menores puede causar un envenenamiento del lecho, "esto no ocasionaría un daño en el lecho", ya que se puede regenerar calentándolo. Pero afectaría la recuperación, ya que se llegaría a lo mismo que los otros procesos; Y esa es una de las importantes ventajas de este último proceso, que se pueden obtener recuperaciones similares a los otros procesos sin tener que realizar regeneraciones en el lecho catalítico.

Como ya se mencionó con todos los tratamientos anteriormente descritos se obtienen muy buenas recuperaciones, y para seleccionar el proceso más adecuado a una planta de recuperación de azufre dada, se tienen que tomar en consideración varios factores entre los que se encuentra el número de equipos, número de válvulas a utilizar, y la posibilidad que se tiene de integrar el proceso con la estructura existente; todo esto para obtener un menor porcentaje de contaminación por dióxido de azufre.

4.5 CRITERIOS DE LA SELECCIÓN DEL PROCESO CLAUS.

En un esfuerzo por seleccionar el mejor proceso que le permitiera cubrir las necesidades de procesamiento de gas de cola en las plantas de azufre en México, PGPB ha llevado a cabo varios estudios internos para decidir cual tecnología le serviría mejor para llegar a obtener mayores recuperaciones de azufre, y disminuir las emisiones de compuestos de azufre. PGPB por medio de un análisis de estos procesos, basado en aspectos técnicos, operativos, económicos y ecológicos; se enfoca en el análisis del proceso CBA y en el proceso Superclaus, ya que estos son los que se apegan más a las condiciones de operación del CPG; además son los más conocidos en el ámbito comercial.

4.5.1 EXPERIENCIAS DE LOS PROCESOS SUPERCLAUS Y CBA.

A continuación algunas plantas del mundo comparten las experiencias que han tenido con los procesos mencionados.

4.5.1.1 PROCESO CBA.

Para las **Plantas CBA**, estas tienen de dos o tres trenes con Claus y una etapa CBA.

Algunos puntos muy particulares de las plantas de ***NORTEAMÉRICA*** son:

La Planta WHITHEY CANYON (USA).
En la operación: video cámara para inspeccionar los lechos catalíticos CBA; el catalizador CBA es cambiado por derramamiento en cada mantenimiento.
En el mantenimiento: derramamiento de sulfuro de hierro (FeS).
En la ingeniería: muy complacidos con CBA ya que es muy tolerante a elevadas temperaturas.

La Planta WEST PEMBINA (Canadá).
En la operación: tratan de tener mantenimientos cada cuatro años.
En el mantenimiento: han tenido algunas cuarteaduras pero son fáciles de reparar; no cambiaron los analizadores para los catalizadores por no realizar una inversión.

La Planta CROSSFIELD (Canadá).
En la operación: arranque fácil a pesar de que fue la primer unidad comercial; concentración de ácido sulfhídrico constante; problemas para enfriar la unidad CBA en los mantenimientos, separan el condensador y utilizan agua fría, lo cual les sirve también como limpieza.
En el mantenimiento: realizaron un paro de 14 hrs no programado; recomiendan poner mucha atención a la operación de las válvulas y evitar en lo posible válvulas de mariposa.

Las plantas entrevistadas coinciden con algunos puntos de vista, los cuales son los siguientes:

En cuanto a la Operación:

- La instrumentación la cambiaron por un mejor sistema de control (sistema de control distribuido).
- No han tenido necesidad de cambiar el catalizador Claus.
- Cambiaron las válvulas de mariposa tradicional por las de Gutermuth de alta calidad por tener problemas de taponamiento.
- La concentración de ácido sulfhídrico en la alimentación cambia constantemente.

En cuanto al Mantenimiento:

- La composición metalúrgica era acero al carbón pero cambiaron a acero inoxidable.
- Para evitar envenenamiento en el catalizador por altas temperaturas utilizan analizadores confiables.
- Mantenimiento cada tres años.
- Entrenamiento estándar de operación, mantenimiento y seguridad.
- No existen fugas de ácido sulfhídrico y/o dióxido de azufre.

En cuanto a la Ingeniería:

- Las razones por la cuales instalaron un proceso de recuperación de azufre adicional, es por la legislación gubernamental, para reducir las emisiones de azufre.
- La recuperación sobrepasa la garantía de recuperación.
- Tienen ciclos de operación de 24 ó de 48 hrs, de los cuales la mitad utilizan para recuperación y la otra mitad para regenerar los reactores.
- Si tuvieran que instalar otra planta pensarían nuevamente en CBA, piensan que es el mejor proceso para sus necesidades.

4.5.1.2 PROCESO SUPERCLAUS.

Para las **Plantas Superclaus**, estas operan con dos o tres etapas Claus y una unidad Superclaus.

Algunos puntos muy particulares de las plantas que se encuentran en ***EUROPA*** son:

La Planta NESTE OY (Finlandia).

En la operación: tuvieron que expandir la unidad de amina ya que era muy pequeña.

En el mantenimiento: tuvieron un poco de corrosión en la línea de ventilación del coalescedor y en la alimentación del incinerador pero se resolvió con un reemplazo de acero al carbón y mediante un sistema de vapor para mantener altas temperaturas; para cuidar el catalizador se utiliza una señal electrónica.

La Planta KUWAIT PETROLEUM EUROPPORT (Holanda).
En la operación: durante el arranque hubo algunos bloqueos por condensación de azufre, lo cual se soluciono mediante venas de vapor; utilizan un enriquecimiento de oxígeno cuando la capacidad del crudo en la alimentación excede el 65%; los problemas que han tenido es por un daño en el quemador, provocando reducciones en la presión.
En el mantenimiento: el único procedimiento preventivo, es el programa regular de inspección de corrosión.

La Planta AGIP PETROLI (Italia, no siguen instrucciones del licenciador).
Esta planta operaba con un CBA, pero no pudieron mantener el equipo, ya que tuvierón muchos problemas con las válvulas, por lo cual decidierón cerrar y convertir en un Superclaus (poca experiencia).
En la operación: tuvo problemas con las temperaturas y la conversión, lo cual dañó el catalizador; problemas con el analizador debido a una mala ubicación; no tiene toda la carga del catalizador por ahorrar costos; el catalizador se daño por elevar la temperatura; los porcentajes de recuperación son de 98–98.5% y la garantía es de 99%. Opinan que Superclaus les funciona bien a pesar de que la segunda etapa tiene poca recuperación y la tercera es nula, si funcionaran bien obtendrían una mayor recuperación.
En el mantenimiento: los analizadores tienen mal mantenimiento; la metalúrgia del Superclaus es acero inoxidable ya que anteriormente se tenía CBA; las lechos catalíticos fueron dañados por altas temperaturas en el arranque; tienen su catalizador viejo lo cual reduce la tasa de recuperación; el diseño requería mejores analizadores pero no quisieron realizar el gasto.
En la ingeniería: eligieron Superclaus por problemas que tuvieron con CBA; están muy convencidos con Superclaus, nunca lo estuvieron con CBA.

La Planta ESSO ITALIANA (Italia, no siguen las instrucciones del licenciador).
En la operación: no había suficiente potencia en el soplador durante la fase de acondicionamiento.
En el mantenimiento: importante enchaquetar y aislar donde puede ocurrir condensación, para mantener el catalizador, monitorear la concentración del oxígeno y ácido sulfhídrico con analizadores; para que el proceso funcione adecuadamente recomiendan seguir las especificaciones y no tratar de ahorrar en analizadores, válvulas de control o entrenamiento si fuera necesario.

La Planta REPSOL TARRAGONA (España).
En el mantenimiento: para mantener el catalizador controlan la temperatura con un sistema ABC, los analizadores son fundamentales para evitar daños al catalizador.
En la ingeniería: selección amplia del proceso.

Algunos puntos muy particulares de las plantas que se encuentran en ***AMERICA*** son:

La Planta SHELL CANADA LIMITED (Canadá).

En el mantenimiento: en las partes internas del Superclaus y en su línea enriquecedora de oxígeno originalmente requería acero inoxidable, pero ahora prueban acero al carbón.

En la ingeniería: seleccionaron Superclaus porque era el que les generaba menor inversión, consideraron el CBA y piensan que es muy bueno pero tenían problemas de espacio, además con tantas válvulas y los cambios en los ciclos son muy complicados, mientras que con el Superclaus tienen una operación muy estable.

La Planta NORTHSTAR ENERGY (Canadá).

En la operación: el único problema que tuvieron en el arranque fue el bloqueo de una válvula, pero la sacaron y la limpiaron y no tuvieron más problemas; el único problema actual es el sistema de amina el cual opera por arriba de su capacidad, provocando cambios en la operación.

En el mantenimiento: se abren las válvulas del bypass una vez al mes para asegurarse que están en buenas condiciones; se realizan paros cada 4 años por los problemas con las aminas.

En la ingeniería: para la selección también consideraron el MCRC pero con tantas válvulas pensaron que era un problema potencial, también analizaron el SCOT pero requiere mucha mano de obra y es muy caro; si tuvieran que poner otra planta pensarían nuevamente en Superclaus pero con mayor capacidad en el sistema de aminas.

La Planta SUNCOR ENERGY INC (Canadá).

Esta planta se expandió de un programa piloto, por lo cual se tiene poco espacio.

En la operación: problemas con el agua amarga, lo cual causaba a su vez problemas de amoniaco y esto bajaba la recuperación de azufre pero al mejorarlo beneficiaron al Superclaus; el analizador de oxígeno no es confiable, lo controlan con un algoritmo creado específicamente para esto.

En el mantenimiento: mejores quemadores les ayudaría a resolver los problemas de amoniaco; tienen problemas con los analizadores; algunas partes internas tiene acero inoxidable; al elevar la temperatura (dentro de los permitido) al principio del proceso se mejora la eficiencia de Superclaus.

En la ingeniería: piensan que Superclaus es muy eficiente en el aprovechamiento; aunque están muy satisfechos con Superclaus, están planeando instalar SCOT en otra planta para alcanzar una recuperación mayor.

Las plantas entrevistadas coinciden con algunos puntos de vista, los cuales son los siguientes:

En cuanto a la Operación:

- No requieren entrenamiento especial para su personal, ya que con la experiencia que se tenía era suficiente, por ser procesos similares.
- Arranque estable y sin problemas.
- El catalizador Superclaus funciona muy bien.
- La garantía de recuperación es superada.

En cuanto al Mantenimiento:

- Ningún problema con la metalurgia del sistema, la cual es acero al carbón.
- El entrenamiento de seguridad es general, solo para familiarizarse con el manejo de H_2S, no es intensivo.
- Para evitar el envenenamiento del catalizador, se utiliza un sistema electrónico el cual realiza un "bypass" al reactor cuando se eleva la temperatura.
- Se realizan paros por mantenimiento cada 3 o 4 años, sin embargo, a la fecha no ha sido necesario reponer el catalizador de las primeras instalaciones Superclaus, con más de diez años en operación.

En cuanto a la Ingeniería:

- Las razones por la cuales instalaron un proceso de recuperación de azufre adicional, es por la legislación gubernamental, para reducir las emisiones de azufre.
- Muy convencidos con Superclaus piensan que es la mejor tecnología.
- Si tuvieran que instalar otra planta lo harían con Superclaus.

4.5.1.3 IDENTIFICACIÓN DE FALLAS Y CONSECUENCIAS EN UNA PLANTA CBA EN RELACIÓN A UNA PLANTA SUPERCLAUS.

Problema.	Causa derivada del proceso CBA.	Comportamiento en el proceso Superclaus.
Aumento de la presión antes de la planta de azufre y endulzadoras.	Obstrucción de válvula por solidificación de azufre.	Solo existe una válvula a través del flujo normal del proceso, la cual opera normalmente abierta. No hay posibilidad de obstrucción durante la operación normal.
Se detectan altas concentraciones de H_2S dentro de la planta.	Fuga en algunas de las bridas de las válvulas.	La posibilidad de fuga de este proceso es 1/8 menor que en el proceso CBA ya que hay 8 válvulas menos.
Baja producción de azufre	Contaminación de catalizador por mala combustión del gas de regeneración. Desactivación del catalizador.	No se usan calentadores directos en este proceso. No introduce gas combustible adicional al proceso.
Planta de azufre fuera de operación	Reparación de válvulas o equipos periféricos, cambio de catalizador por envenenamiento con carbón.	La planta de azufre no estará fuera de operación por estas causas.

Problema.	Causa derivada del proceso CBA.	Comportamiento en el proceso Superclaus.
No abren o cierran las válvulas de acuerdo al ciclo.	Falla del programa de ciclos de válvulas.	Este problema no se presenta ya que este proceso no tiene válvulas cíclicas.
Alta temperatura en el reactor catalítico.	No hay posibilidad, ya que el proceso trabaja a bajas temperaturas.	Por alta concentración de H_2S Desvío de la corriente de proceso al oxidador térmico. No implica paro de toda la planta de azufre.

Tabla 4.2. Fallas y consecuencias de una planta CBA y SUPERCLAUS.

4.5.2 SELECION DEL PROCESO SUPERCLAUS.

Como se mencionó los procesos seleccionados fueron el CBA y el Superclaus para aplicar al CPG; aunque todos los procesos descritos obtienen altas recuperaciones de azufre. Estos dos son los que más se apegan alas condiciones de proceso, ya que es como si fuera otra etapa más Claus, además con estos procesos se puede obtener azufre líquido y la corriente de regeneración es parte de la línea de proceso.

Dependiendo del proceso de recuperación que se esté manejando, y de sus necesidades para obtener una cierta recuperación de azufre, se tiene que elegir el tratamiento de gas de cola que más convenga utilizar. La mayoría de las veces las plantas que realizan recuperaciones de azufre con reactores Claus, posteriormente añaden tecnología CBA o Superclaus. En cada uno de los casos, la administración tuvo sus razones para tener recuperaciones adicionales de azufre.
Auque ya se mencionaron las ventajas y desventajas de los procesos, para fin de comparación se vuelven a mencionar.

PROCESO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CBA	➢ Recuperación de azufre de 98-99.5 %. ➢ El gas de cola entra directamente al reactor. ➢ Utiliza mínimo dos convertidores catalíticos (uno para absorción y el otro para regeneración). ➢ Se utiliza la línea de proceso para la regeneración. ➢ Se obtiene azufre líquido. ➢ Menor personal operativos, debido a que no hay un gran número de equipos.	➢ Recuperación de azufre de 98-99.5 %. ➢ El gas de cola entra directamente al reactor. ➢ El catalizador requiere regeneración. ➢ Utiliza un gran número de válvulas para la regeneración. ➢ La operación es cíclica y los equipos están sometidos a condiciones severas de operación, por lo cual es más vulnerable a fallas; corrosión y paros no programados. ➢ Al hacer una evaluación de los potenciales puntos de fuga, se considera que los riesgos son mayores en el proceso CBA ,debido al mayor número de uniones bridadas. Y el H_2S es un gas letal aún llegando a ser inhalado en bajas concentraciones.
SUPERCLAUS	➢ Recuperación de azufre del 98.5-99.5%. ➢ Utiliza un convertidor catalítico. ➢ El catalizador no requiere regeneración. ➢ No requiere válvulas para regeneración. ➢ Proceso muy similar al de las plantas Claus. ➢ Se obtiene azufre líquido.	➢ Se utiliza para gases de cola de gas ácido con una concentración de H_2S de 0.8-1.5% mol. ➢ Utiliza una corriente de aire. ➢ Catalizador caro. ➢ Requiere de un analizador de gas de cola.

PROCESO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	➢ Menores costos operativos, debido a que no existe una gran instrumentación. ➢ Proceso continuo. ➢ Menor requerimiento de área. ➢ Mayor tiempo de vida del catalizador. ➢ Ya que el azufre es formado en la fase gaseosa, y recolectado en un condensador de azufre. No se contamina con posibles químicos. ➢ No se requieren de equipos adicionales en el caso de que un tercer reactor Claus, tuviera que ser cambiado a reactor Superclaus. ➢ Menor requerimiento de área. ➢ Mayor tiempo de vida del catalizador.	

Tabla 4.3. Análisis comparativo del Proceso CBA y SUPERCLAUS.

Comparando las tablas 4.2 y 4.3, se ve que en el CBA pueden ocurrir mayor número de fallas, ya que utiliza un mayor número de unidades de proceso (válvulas), el lecho catalítico necesita ser regenerado, el proceso es cíclico y utiliza un mayor espacio físico. Lo cual no pasa con el Proceso Superclaus, ya que es un proceso continuo, no necesita regenerarse el lecho catalítico, utiliza solamente un reactor, no necesita un gran número de válvulas, el azufre se obtiene "directamente" liquido y no por regeneración; y las fallas y/o desventajas de éste proceso son mínimas comparadas al proceso CBA.
Ya que aunque ambos procesos son muy parecidos, se puede observar que los problemas asociados a ellos son muy diferentes.

La tendencia tecnológica a nivel mundial se inclina hacia el proceso Superclaus, ya que se logran grandes recuperaciones, con una menor número de equipo (reactores, tubería, válvulas, regeneraciones, personal,,,). Del total de las 52 plantas construidas en los últimos cinco años el

75% se han ejecutado bajo la tecnología Superclaus, y de las 16 plantas construidas para centros de procesamiento de gas, el 56% han sido bajo la licencia Superclaus.

Por todo lo expuesto anteriormente, y debido a las características del proceso Superclaus que son muy parecidas al proceso Claus, se selecciona el Tratamiento de Gas de Cola Superclaus para aplicarlo al proceso de recuperación de azufre en el CPG de Nuevo PEMEX, Tabasco.

Una vez seleccionado el Tratamiento de Gas de Cola a aplicar en el CPG, a continuación se procede a la descripción del proceso de recuperación de azufre Claus, más el proceso Superclaus. Que es donde se desarrolla la parte de la Ingeniería básica.

5. DESCRIPICION DEL PROCESO CLAUS Y SUPERCLAUS

En este capítulo se da una explicación tanto de la termodinámica como de la cinética del proceso Claus-Superclaus, empleado en éste Proyecto para disminuir las emisiones de SO_2 que se descargan hacia la atmósfera, en el Complejo Procesador de Gas de Nuevo PEMEX. Tabasco. Las unidades recuperadoras de azufre (SRU's), se modernizarón para tener una capacidad aproximada de 400 TMPD (toneladas métricas por día de recuperación de azufre), y están basadas en el proceso CLAUS, para recuperar azufre elemental a partir de una corriente de gas que contiene H_2S, además se incluyó el tratamiento de gas de cola SUPERCLAUS para cada unidad. El gas de cola de la etapa final será enviado hacia el oxidador térmico. Así mismo, las fosas de azufre existentes han sido equipadas con el proceso de desgasificación para reducir su contenido de H_2S.

5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO CLAUS

Como ya se mencionó la recuperación de azufre se lleva a cabo con el conocido proceso Claus; las SRU's están formadas generalmente por dos secciones, la primera se le denomina térmica, en la cual el azufre del H_2S es recuperado a altas temperaturas, y la segunda sección se le llama catalítica en donde el azufre es obtenido a bajas temperaturas, a través de varias etapas catalíticas (el número de etapas catalíticas depende del porcentaje de recuperación que se desea obtener). La reacción Claus, es una reacción que esta en equilibrio, y el que se lleve o no a cabo depende de la concentración de reactivos y productos, así como de las condiciones de operación.

La alimentación de gas ácido proviene del cabezal de gas ácido, y se introduce a través del Tanque Separador de Gas Ácido (201-V). El agua amarga es separada en este tanque, en el caso de que se presente alto nivel de líquido, se activa la Bomba de Agua Amarga (201-P/PA), y se continuará bombeando hasta que se alcance un nivel adecuado en el tanque separador de gas ácido. El aire que va hacia el Quemador Principal (201-R), es suministrado por el Soplador de Aire (201-K) accionado con turbina de vapor. Este soplador también suministra aire a la etapa Superclaus y a la fosa de desgasificación de azufre líquido (Diagrama 5.1).

5.1.1 ETAPA TÉRMICA

Esta sección consiste en un quemador, un horno de reacción, un recuperador de calor y un condensador, de los cuales los tres primeros se encuentran en un mismo equipo llamado Reactor Térmico o Reactor Principal.
Como ya se mencionó, fue la industria química alemana la que mejoró considerablemente el Proceso Claus original. Ya que la oxidación del ácido sulfhídrico con oxígeno para dar azufre elemental, es una reacción altamente exotérmica, la cual conduce a temperaturas donde el equilibrio termodinámico limita fuertemente la reacción, el mejoramiento realizado por I.G.

Farben consistió en la oxidación parcial de un tercio de gas ácido (principalmente H_2S) con oxígeno para dar dióxido de azufre a elevadas temperaturas, ésta reacción no es limitada termodinámicamente y se realiza en la entrada del reactor térmico. La mayor recuperación de azufre se realiza en esta sección.

5.1.1.1 QUEMADOR

Aquí la temperatura de combustión tiene que ser lo suficientemente alta (aprox. 931°c) para que se mantenga una flama estable, ya que si no sucede esto se generan muchos problemas, como el que se incremente el CO_2 debido a una mala combustión, y por consecuencia se incremente la cantidad de COS y CS_2, además de ocasionar excesiva cantidad de impurezas, lo cual llega a causar problemas operacionales, de corrosión, taponamiento, etc. Pero esta alta temperatura también reduce la eficiencia de la reacción Claus, ya que es una reacción exotérmica, sin embargo esto es compensado por las bajas temperaturas de operación en la sección catalítica. Por otra parte abajo de esta temperatura la estabilidad de la flama es muy pobre y la frecuente aparición de oxígeno en el efluente del Recuperador de Calor indica que la velocidad de reacción es lenta. Además se debe tener la consideración para la relación 2:1 (H_2S:SO_2) que se necesita a la salida del Reactor Térmico.
Con alimentaciones de bajas concentraciones se debe utilizar la configuración de flujo dividido (para poder constatar que en la entrada de la sección catalítica exista la relación deseada), la pregunta de cuanto gas ácido debe ser enviado por el bypass no es siempre fácil de responder, ya que si mucho es desviado llegara O_2 a los convertidores y desactivara el catalizador, si también poco es desviado, no se puede conseguir la relación deseada. Todo depende de la composición del gas ácido, condiciones del proceso así como de la recuperación deseada.

Es por ello que aquí el proceso se maneja en el modo de flujo dividido, (porque el gas ácido que se trabaja aquí llega con una concentración del 39.13% de H_2S) por lo cual dos tercios de la corriente de alimentación se desvían a través del bypass conectándose con la corriente de salida del Recuperador de Calor (201-EX), y el resto que es un tercio se envía a través del quemador (Reactor Térmico); el quemador está basado en la combustión parcial del ácido sulfhídrico, por lo cual solamente 1/3 del H_2S que entra al reactor se transforma a SO_2, con una proporción controlada de oxígeno (flujo de aire); al mismo tiempo quema todos los hidrocarburos a CO_2. Además si hay NH_3 presente se debe adicionar más O_2 para transformarlo a N_2, todo esto es esencial para que todo el oxígeno sea propiamente mezclado con el combustible, con lo cual se logra una buena combustión y una buena conversión térmica Claus, también para evitar que O_2 libre penetre en el horno de reacción; además la proporción de aire y H_2S se debe controlar para obtener una relación de H_2S:SO_2 exacta de 2:1 en el gas efluente que va hacia la sección catalítica. Ya que esta es la proporción optima para la reacción Claus; y al mismo tiempo se debe obtener un porcentaje de H_2S de 0.5–0.8 %vol. en la entrada del convertidor de oxidación selectiva (convertidor SUPERCLAUS).

En esta parte de la sección térmica (quemador) se lleva a cabo la *primera parte* de la reacción Claus:

$$H_2S + 3/2\,O_2 \longrightarrow SO_2 + H_2O + \text{calor (exotérmica)}$$

Y demás reacciones de oxidación:

$$CH_4 + 2\,O_2 \longrightarrow CO_2 + 2\,H_2O$$
$$2\,NH_3 + 3\,O \longrightarrow N_2 + 3\,H_2O$$

5.1.1.2 HORNO DE REACCIÓN

En el *horno de reacción* la conversión con flama estable del H_2S a azufre es termodinámicamente limitada a menos del 75% a altas temperaturas de operación (altas conversiones son obtenidas a bajas temperaturas en la sección catalítica). Aunque la temperatura del horno también es función de la energía neta liberada por las reacciones químicas efectuadas aquí, y por la cantidad de material que pasa a través del horno. Como ya se mencionó la temperatura de combustión tiene que ser lo suficientemente alta, ya que abajo de esta temperatura, la flama (en el horno de reacción) es pobre y una frecuente aparición de oxígeno libre en el efluente del recuperador de calor indica, que la velocidad de reacción es lenta.

Como se sabe, el gas ácido contiene una cantidad significante de impurezas (HC's, CO_2, NH_3, etc). Algunas de las cuales se convierten en sulfuro de carbonilo (COS) y disulfuro de carbono (CS_2), a su vez estos compuestos han presentado problemas, por el hecho que en esta forma no se puede recuperar fácilmente el azufre.

$$CO_2 + H_2S \longrightarrow COS + H_2O$$
$$CO + 1/2\,S_2 \longleftrightarrow COS$$
$$CH_4 + SO_2 \longleftrightarrow COS + H_2O + H_2$$
$$CH_4 + 2\,S_2 \longleftrightarrow CS_2 + 2\,H_2S$$
$$CO_2 + 2\,H_2S \longleftrightarrow CS_2 + 2\,H_2O$$
$$C + S_2 \longrightarrow CS_2$$
$$CS_2 + SO_2 \longleftrightarrow 3/2\,S_2 + CO_2$$

Una vez que sea formado el SO_2 en el quemador, éste reacciona con el mayor porcentaje de H_2S (los cuales son dos tercios) para obtener azufre elemental, esta es la segunda etapa de la reacción Claus. A esta temperatura del horno de reacción, todo el vapor de azufre esta en forma de S_2 (esta etapa proporciona un tiempo necesario de residencia para acercase a las condiciones de equilibrio).

Segunda parte de la Reacción Claus en la etapa térmica:

$$2\,H_2S + SO_2 \longleftrightarrow 3/2\,S_{2(VAPOR)} + 2\,H_2O$$

5.1.1.2.1 Termodinámica y Cinética de la Etapa Térmica

En condiciones estables de proceso, éste puede operar adecuadamente para lograr una buena eficiencia, pero alguna perturbación puede conducir a una considerable pérdida de la eficiencia. El problema en parte es debido a que la reacción química complica la culminación del proceso; las variaciones en la proporción del aire y ácido sulfhídrico desordenan el balance entre el ácido sulfhídrico y el dióxido de azufre, y cualquiera que esté en exceso pasa a través del proceso sin cambiar. Además los cambios en la temperatura del reactor catalítico reducen la eficiencia.

La química del proceso Claus es más compleja que una simple reacción química. Esto es en parte debido a la variedad de reacciones que se efectúan con compuestos que contienen azufre y otros componentes del gas ácido, como es el dióxido de carbono, metano, amonio y nitrógeno del aire; y particularmente debido al equilibrio de diversas formas moleculares para obtener vapor de azufre elemental (S_2-S_8). La siguiente grafica (Fig.5.1) muestra el efecto que tiene la temperatura en la conversión, para obtener el azufre. En ésta gráfica la región derecha de la curva representa la sección térmica, este efecto empieza por encima de los 550°c ya que en tal punto la mayoría de azufre se encuentra en forma de S_2, por lo cual la concentración de azufre en el equilibrio empieza a incrementarse, además de que una proporción significante de H_2S empieza a descomponerse en sus elementos. *Este es el principal mecanismo por el cual el azufre es producido en el horno de reacción.*

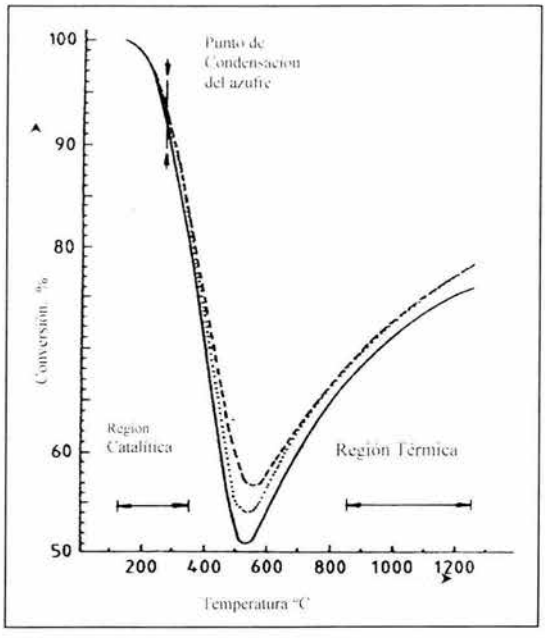


Figura 5.1. Conversión de equilibrio de ácido sulfhídrico a azufre

Todas las reacciones que pudieran llevarse a cabo, para obtener la mayor recuperación de azufre del gas ácido (y de esta forma tener listo el reactivo para la siguiente sección), se realizan en el horno de reacción. La química de las etapas catalíticas es mejor comprendida, particularmente porque es en estas unidades donde generalmente se logra un mayor equilibrio termodinámico de la reacción Claus, y la limitación cinética ocurre, cuando el catalizador llega a una significante desactivación.

Pero la etapa térmica (horno de reacción) es por comparación relativamente desconocida, ya que la química en la zona de flama es extremadamente compleja e impredecible; el grado de la limitación cinética en cada una de las reacciones depende de muchas variables, el factor más importante aunque parece ser la concentración del H_2S en el gas ácido, es el tiempo de residencia, la temperatura de la flama, cantidad y tipo de contaminantes en la alimentación, número de corrientes de alimentación y calor liberado, ya que juegan un papel muy importante en la culminación de la reacción Claus.

Antes de empezar con la explicación termodinámica y cinética de la sección térmica, se proporciona una breve definición de algunos conceptos utilizados:

OXIDACIÓN: Proceso en el que hay pérdida de electrones, el agente reductor se oxida, el agente reductor pierde uno o más electrones.

$$S^{-2} \longrightarrow S_2^{0}$$

agente reductor oxidante

REDUCCIÓN: Proceso en el que hay ganancia de electrones, el agente oxidante se reduce, el agente oxidante gana uno o más electrones.

$$S_2^{0} \longrightarrow S^{-2}$$

agente oxidante reductor

DISOCIACIÓN: Se le llama así al rompimiento de átomos en una molécula, para deshacer el enlace de dicha molécula, los átomos pueden reagruparse para formar nuevamente la molécula.

$$2\,H_2S \longrightarrow S_2 + 2\,H_2$$

RADICALES: Denominación a un átomo o grupo de átomos tales que contienen un electrón no apareado. Los radicales libres son por lo general, eléctricamente neutros en consecuencia no hay atracción electrostática entre ellos, como la hay entre iones. Además la mayoría de los radicales libres son de alta energía y por lo tanto son inestables y muy reactivos.

$S^{\bullet}$

ION: Átomos cargados eléctricamente son carga positiva o negativa, dependiendo si hay ganancia o pérdida de electrones.

OH^{-}

Si el ión tiene carga positiva se le llama *reactivo electrófilo* H^{+}, y si el ión tiene carga negativa se le llama *reactivo nucleófilo* OH^{-}.

RUPTURA HOMOLITICA: Cuando una molécula se rompe y da lugar a radicales libres.

$$A:B \longrightarrow A^{\bullet} + B^{\bullet}$$

RUPTURA HETEROLITICA: Cuando una molécula se rompe y da lugar a iones.

$$A:B \longrightarrow A^{+} + B^{-}$$

La recuperación de azufre en la sección térmica, tiene un importante efecto en la operación de los convertidores catalíticos. Esta recuperación de la etapa térmica se logra por la reducción del SO_2 en el horno de reacción, así mismo por la relación H_2S/SO_2 y por la disociación del H_2S a H_2 y S_2 la cual es endotérmica. Alrededor del 55% del azufre que se recupera en esta sección es por esta disociación y no por la reacción Claus (ambas reacciones se realizan en el mismo momento). El H_2 necesario para la reducción del SO_2 se incrementa

por la disociación del ácido sulfhídrico a H_2 y S_2. La oxidación parcial del H_2S es un importante camino para la producción de azufre.

La química de la oxidación parcial concluye en el horno; la complejidad de la química fue prevenida por Paskall.

Todo el paso de la oxidación parcial es resumida por la ecuación:

$$10\,H_2S + 5\,O_2 \longrightarrow 2\,H_2S + SO_2 + 7/2\,S_2 + 8\,H_2O + \text{calor}$$

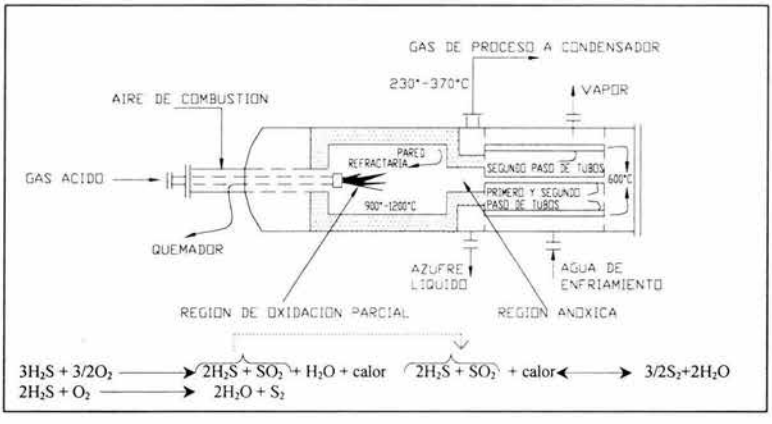


Fig.5.2. Características del horno de reacción.

La figura 5.2 ilustra la presencia de la zona de flama de oxidación parcial y la región anóxica, la cual es definida como la región en donde no hay O_2. La química en la zona de la flama es dominada por radicales ya que la temperatura de operación es muy grande, y esto hace que se rompa el enlace (por lo cual se dice que el mecanismo de reacción es por radicales libres), sobre estas condiciones el azufre existe como simples átomos de S, y el H_2O formada en la combustión existe como $H^{\bullet}$ y $OH^{\bullet}$. Teniendo en cuenta solamente las pocas reacciones posiblemente mas complejas en el trayecto de la oxidación parcial, se puede predecir que el H_2 es un producto primario, ya que:

$$2\,H_2S + O_2 \longrightarrow 2\,OH^{\bullet} + 2\,HS^{\bullet}$$
$$2\,HS^{\bullet} \longrightarrow [H_2S_2] \longrightarrow S_2 + H_2$$

estas ecuaciones representan la parte de la oxidación parcial del H_2S a H_2 y S_2 con la asociación de los radicales $OH^{\bullet}$ y $H^{\bullet}$ para formar H_2O y más H_2 y S_2:

$$2\,OH^{\bullet} + 2\,H_2S \longrightarrow 2\,H_2O + 2\,HS^{\bullet} \longrightarrow H_2 + S_2 + 2\,H_2O$$

La velocidad de las reacciones en la zona de la flama es probablemente controlada por las limitaciones de especies en colisión, con excepción de esas que involucran la molécula de N_2, que poseen suficiente energía para la correspondiente reacción química.

Por otra parte el SO_2 también es formado por la asociación de átomos de SO y O. Y solamente cuando las especies cruzan el limite de la zona de la flama y entran a la región anóxica esas moléculas efectúan una reacción elemental.

Aunque éste es un camino importante de la reacción Claus, no se debe olvidar que el ácido también se oxida a SO_2.

Existe una producción alta de átomos de H_2 en la zona de flama y además se da una rápida reacción de este con el SO_2 a temperaturas de la región anóxica, con lo cual se promueve una considerable producción de azufre de acuerdo a:

$$2\,SO_2 + 4\,H_2 \longrightarrow S_2 + 4\,H_2O$$

Estas reacciones sugieren que debe haber múltiples pasos en el proceso, unas quizás involucrando el SO y SO_2 entre otras especies; y esto se complica más por la posibilidad de que el S_2 pueda ser reducido a H_2S o que reaccione con H_2O:

$$S_2 + 2\,H_2 \longleftrightarrow 2\,H_2S$$
$$2\,H_2O + 3/2\,S_2 \longleftrightarrow 2\,H_2S + SO_2$$

Esta ultima reacción, es la reacción reversible Claus, y aunque en la estequiométrica se observa que debe seguir un camino de reacción compleja a la temperatura de la región anóxica, en donde el S_2 es la mayor especie de azufre, tiene una gran importancia en el horno Claus, por su influencia en la disociación del H_2S.

La limitación cinética incrementa el trabajo de carga de las siguientes unidades (convertidores catalíticos); ya que la cantidad de aire requerido no es totalmente utilizado, porque el O_2 no es ocupado para disociar el H_2S y producir H_2 y S_2, al mismo tiempo la producción del CO a partir de la disociación del CO_2 produce O_2; también la temperatura de flama es reducida porque la disociación del H_2S reduce la cantidad de ácido que debe ser quemado para mantener la proporción 2/1, aunado a que el H_2 y CO son productos de reacciones

endotérmicas. Además como el COS también es formado por el CO, altos niveles de COS ocurren cuando hay altos niveles de CO.

Por todo esto y lo anterior se tiene que poner mucha atención en la cantidad de oxígeno que se adiciona a la sección térmica; por otra parte la gráfica que ilustra la reacción Claus (figura 5.1), solamente dice que en la sección térmica el azufre es recuperado a altas temperaturas, ya que la mayoría del azufre que se obtiene aquí es por la disociación del H_2S y esta reacción es altamente endotérmica.
Se puede decir que es aquí donde se lleva a cabo considerablemente la reacción Claus, porque es donde empieza a efectuarse la reacción, y la concentración aquí es mayor que en las demás etapas (pero la reacción Claus se tiene que realizar a bajas temperaturas, para obtener buenas recuperaciones ya que la reacción es exotérmica).

El dióxido de azufre puede actuar tanto como agente reductor ó como agente oxidante, dependiendo del sentido de la reacción. La reacción bien establecida entre el H_2S y el SO_2 representa un ejemplo de la actuación del SO_2 como un agente oxidante. Esta reacción es:

$$2\,H_2S + SO_2 \longleftrightarrow 3/2\,S_2 + 2\,H_2O$$

donde el equilibrio favorece al SO_2 a altas temperaturas, ya que la entalpía del H_2O y S es considerablemente más alta que la del H_2S y SO_2 origina que el equilibrio hacia la derecha se realice a bajas temperaturas; por lo cual la etapa catalítica debe operarse a bajas temperaturas para lograr una alta recuperación de azufre, pero desafortunadamente la reacción es limitada termodinámicamente.

5.1.1.3 RECUPERADOR DE CALOR

Los gases de salida del horno de reacción contienen S_x, H_2S, SO_2, H_2O, N_2, CO_2, CS_2, COS, los cuales entran a la caldera de recuperación para remover el calor generado. El gas pasa a través del haz de tubos instalado dentro de la Caldera de Recuperación (201-EX), y así enfriar esta corriente de gas ácido generando vapor saturado de baja presión; simultáneamente una parte del vapor de azufre es condensado y separado de la corriente gaseosa; en donde la especie S_2 es transformada en otras especies de azufre principalmente S_6 y S_8 (El vapor de azufre se disocia a altas temperaturas desde S_8, a S_2 a través de las especies intermedias S_6 y S_4; y a temperaturas muy altas, el gas consiste solamente en azufre molecular).
El cambio implica un gran número de reacciones las cuales se pueden representar como:

$$S_2 \longleftrightarrow 1/3\,S_6$$

$$S_2 \longleftrightarrow 1/4\,S_8$$

$$1/3\,S_6 \longleftrightarrow 1/4\,S_8$$

$$S_6 \longrightarrow 6S_1$$

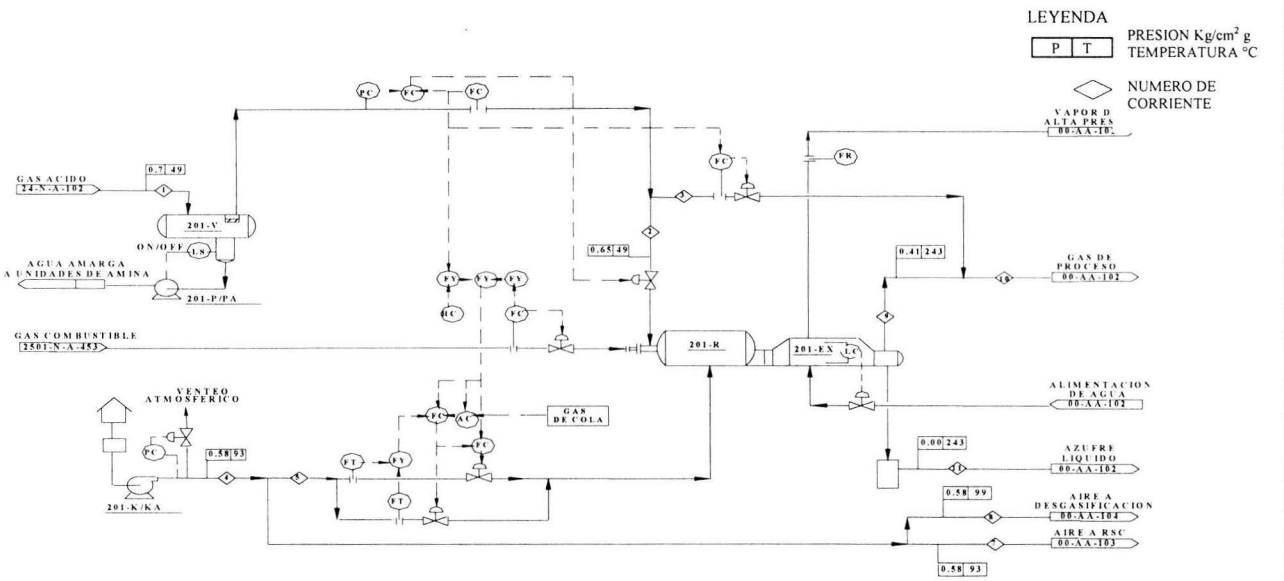
$$S_8 \longrightarrow 8S_1$$

5.1.1.4 CONDENSADOR

El gas de proceso que sale del recuperador de calor se encuentra aún caliente, esté se mezclara con el flujo de gas ácido de alimentación que fue desviado por el bypass. Entonces la mezcla de gas se alimenta al *Primer Condensador* (202-EX), en el cual continua su enfriamiento, y donde es separado de la corriente gaseosa más azufre elemental, generando también vapor saturado de baja presión.

Todos los condensadores operan con temperatura de salida, del punto de condensación del azufre.

201-V	201-P/PA	201-K/KA	201-R	201-EX
SEPARADOR DE GAS ÁCIDO	BOMBA DE AGUA AMARGA	SOPLADOR DE AIRE	REACTOR TERMICO	CALDERA DE RECUPERACION
Dimen. 2286mm DI X 4877mm T/T	Cap. 9.08 m^3/hr Pres. Desc. 1.55 kg/cm^2	Cap. 37625.4 MCSH @ 0.56 kg/cm g	Dimen. 3505mm DI X 11887mm L	Carga Térmica. 19.0 X 1E6 kcal/hr



REV		Aprob	Rev		PLANTA	NUEVO PEMEX TABASCO		DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE SRU REACTOR TERMICO	REV
				UNAM	RECUPERADORA DE AZUFRE	No. De Proyecto	Nuevo Pemex		
A	Preliminar	LFCR	KCV			CV-5500	Tabasco	DIAGRAMA NUMERO: 77051-C-A-101	A

Diagrama 5.1

5.1.2 ETAPA CATALÍTICA

Posteriormente sigue la etapa catalítica en donde el dióxido de azufre reacciona con el ácido sulfhídrico remanente para dar azufre elemental y agua de acuerdo a:

$$2\,H_2S + SO_2 \longleftrightarrow 3/n S_n + 2H_2O$$

Donde Sn representa un alótropo del azufre por lo cual n es un número entero positivo, pero desconocido (puede ser 1,2,6,8 dependiendo de la etapa del proceso).
El azufre que no es recuperado en la sección térmica, pasa a las dos siguientes etapas de reacción catalíticas, en donde la remoción de más azufre mejora la conversión, y la eficiencia de recuperación a más del 98%. El proceso opera con consecutivos convertidores a bajas temperaturas (ya que el equilibrio es favorecido a bajas temperaturas), pero todas alrededor del punto de condensación del azufre por lo cual se debe de controlar la temperatura en el recalentador, y de esta manera incrementar la conversión global a azufre elemental.

La corriente de proceso que abandona el primer condensador, entra al Primer Recalentador de Gas (205-EX) (ya que el gas de proceso necesita ser calentado antes de entrar al convertidor, para prevenir la condensación de azufre en el lecho catalítico), el cual utiliza vapor de media presión para obtener la temperatura óptima de conversión catalítica en el Primer Convertidor Claus (202-R).(Diagrama 5.2); además es muy importante que todo el oxígeno del aire de combustión sea consumido en la sección térmica, ya que si no, puede llegar a desactivar los lechos catalíticos (por la deposición de sulfatos). La temperatura del fondo de la cama del catalizador, en el primer convertidor debe ser lo suficientemente alta para obtener una buena hidrólisis del COS y CS_2, por lo cual la temperatura de entrada se mantiene a 232°c, (la temperatura de entrada podría incrementarse en el caso de que la conversión de COS y CS_2 no sea suficientemente alta).

5.1.2.1 HIDRÓLISIS DEL CS_2 Y COS

Los compuestos de carbono-azufre como el sulfuro de carbonilo (COS) y el disulfuro de carbono (CS_2), han presentado problemas en muchas plantas Claus debido al hecho de que no pueden convertirse con facilidad en azufre elemental y dióxido de carbono. Estos compuestos se forman en la etapa de combustión, por la reacción de los hidrocarburos y del dióxido de carbono, de acuerdo con:

$$CH_4 + SO_2 \longrightarrow COS + H_2O + H_2$$
$$CO_2 + H_2S \longrightarrow COS + H_2O$$
$$CH_4 + 2S_2 \longrightarrow CS_2 + 2H_2S$$
$$1/2\,S_2 + CO \longleftrightarrow COS$$
$$CO + H_2S \longleftrightarrow COS + H_2$$

Son también posibles reacciones más complejas. Estos compuestos, si no se transforman, representan una pérdida de azufre recuperable y un aumento en la emisión de azufre a la atmósfera.
La reacción química de la etapa térmica no convierte todo el H_2S a azufre en un solo paso, por lo que etapas adicionales son necesarias para incrementar la recuperación de azufre.
Como ya se sabe estas especies son producto del Reactor Térmico, pero si se trabaja con un máximo bypass en esta sección se genera menor cantidad de disulfuro de carbonilo y sulfuro de carbono. Este aparente beneficio del bypass no debe ser usado para justificar la cercana operación a la fracción máxima del bypass, porque el beneficio que debe obtenerse es, pensando en el daño si oxígeno libre abandona la sección térmica.
Para realizar la hidrólisis de estos compuestos se requiere de una temperatura de conversión alrededor de 314°c, lo cual solo se puede lograr en el primer reactor catalítico.

El CS_2 y COS son descritos como especies intermedias, porque se les da el tiempo suficiente y condiciones para ser hidrolizadas; menor cantidad de CS_2 es formado a altas temperaturas o si es formado, es rápidamente hidrolizado. La generación del CS_2 es sobre un rango de concentración que va de 1600ppm a 38°c, a 200ppm a 315°c. Esta es la razón por la que a altas temperaturas la reacción de hidrólisis llega a ser más dominante, resultando una menor concentración del CS_2 en la corriente del gas.

La relación para el COS es diferente, ya que a altas temperaturas existe mayor concentración. Como se puede observar en la gráfica (Fig. 5.3);.pero esta alta temperatura logra que el COS tenga una alta energía de activación para poder lograr la hidrólisis y obtener bajas concentraciones de COS a altas temperaturas.

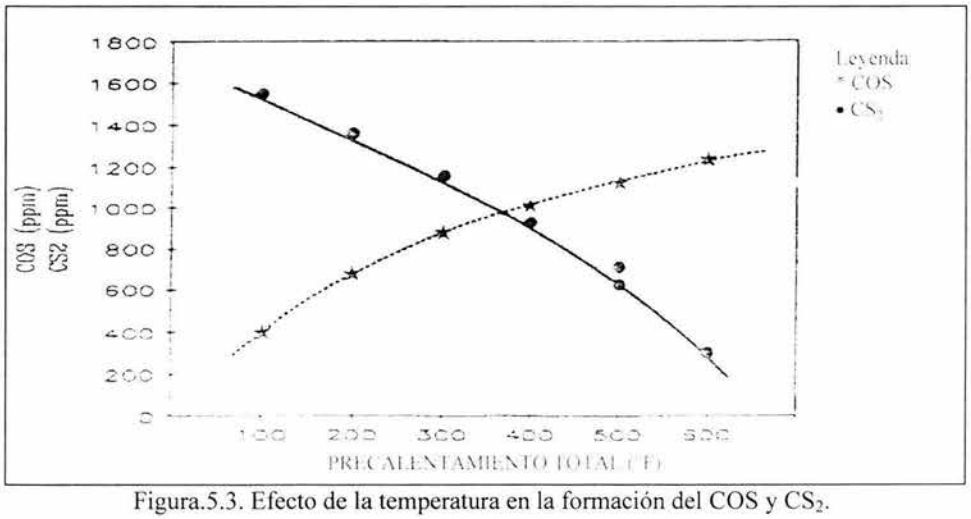


Figura.5.3. Efecto de la temperatura en la formación del COS y CS_2.

Así, con esto se concluye que estas especies intermedias tienen diferentes modelos de comportamiento sobre cierto rango. El CS_2 es relativamente fácil para formarse y fácil para hidrolizar, mientras que el COS es lento para formarse y más difícil para hidrolizarse. Estas especies podrían ser hidrolizadas en cualquiera de las etapas catalíticas pero las altas temperaturas harían que la reacción Claus fuera lenta, y en este caso tendrían que requerir de un largo tiempo de residencia. El problema con estas especies es el efecto que tienen sobre toda la eficiencia de la recuperación, ya que si estas no son hidrolizadas no se recupera el azufre (regresarlo a H_2S o SO_2) que esta involucrado. Y un 10% del azufre puede llegar a ser atrapado en esos compuestos, esto repercutiría en una dramática perdida para la eficiencia de la planta ya que no se podría recuperar la mayor cantidad posible de azufre. Este problema es doblemente importante para el CS_2 porque cada molécula contiene dos átomos de azufre y estos compuestos son más difícil para hidrolizar en las siguientes etapas catalíticas por las bajas temperaturas.
Por lo cual la hidrólisis se tiene que realizar en el primer convertidor catalítico a la mayor temperatura posible.

$$COS + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2S$$
$$CS_2 + 2\,H_2O \longrightarrow CO_2 + 2\,H_2S$$

Este primer convertidor utiliza un catalizador con base de titanio, el cual es insensible a la sulfatación, con una capa superior de alúmina, (ésta capa protege al titanio contra el hollín), la cual ayuda en la distribución de gas y remoción de partículas refractarias de la corriente de gas de alimentación, esto mejora la reacción de H_2S y SO_2 para producir azufre elemental durante la hidrólisis del COS y CS_2; tanto el ácido sulfhídrico como el dióxido de azufre reaccionan sobre el catalizador hasta que se alcanza el equilibrio.

5.1.2.2 REACCION CLAUS
El SO_2 generado en el quemador es el mismo que interviene en la reacción Claus de las etapas catalíticas. La reacción de ésta sección es un poco diferente que en la sección térmica, la cual es:

$$2\,H_2S + SO_2 \longleftrightarrow 3/6\,S_6 + 2\,H_2O + \text{calor}$$
ó
$$2\,H_2S + SO_2 \longleftrightarrow 3/8\,S_8 + 2\,H_2O + \text{calor}$$

En la sección térmica el S_2 es recuperado de una reacción endotérmica. Sin embargo el S_6 y S_8 formado aquí son ambos de reacciones exotérmicas, por lo cual el equilibrio de la sección catalítica es logrado a bajas temperaturas. La temperatura de salida de los convertidores determina la conversión de equilibrio; pero al mismo tiempo la operación de los convertidores es controlada por la cantidad de calor que es aplicada al recalentador (por lo cual se debe tener un gran control en la temperatura de entrada de los convertidores).

El gas que sale del primer convertidor entra al Segundo Condensador de Azufre (206-EX) el cual genera vapor de baja presión, después el gas de proceso entra a otra etapa catalítica, igual a la anterior pasando por un Segundo Recalentador (206-EX), para luego alimentarlo al Segundo Convertidor Claus (203-R) y después enfriar la corriente de proceso en el Tercer Condensador (204-EX) (Diagrama 5.2). La temperatura de entrada del segundo convertidor es de 205°c, la cual es más baja que la del primer convertidor, esto promueve una alta conversión del H_2S y SO_2 a S_x. Bajo condiciones de baja producción de la planta (abajo del 40%) la temperatura de entrada deberá incrementarse a 215°c para evitar condensación en el lecho del catalizador (la diferencia aquí es la temperatura de entrada del segundo convertidor la cual es menor que la del primero); se debe enfatizar en el cuidado de la temperatura de entrada de los convertidores, para evitar que ocurra una condensación en el lecho catalítico, ya que esta temperatura es cercana al punto de condensación del azufre.
La reacción Claus se desplaza hacia la derecha, para producir más azufre usando el catalizador Claus. La condensación después del primer convertidor Claus hace posible mayor conversión a azufre en la siguiente etapa catalítica (ya que se elimina el azufre y después se tiene que volver a formar más de éste para lograr el equilibrio de la reacción).

Existen compuestos reaccionantes que pueden unirse a ciertas condiciones de presión y temperatura, y permanecer en un estado de mezcla por un tiempo muy grande sin que la reacción se lleve a cabo de una manera significante. Por lo cual muchas reacciones se ven influidas por la presencia de sustancias con capacidad de acelerar o disminuir la velocidad, que se conocen con el nombre de *catalizadores*, y las reacciones afectadas se dice que son catalizadas. En la combustión de la materia orgánica, incluidos los hidrocarburos, es muy factible la oxidación catalítica, pues se consigue el efecto deseado a temperaturas muy inferiores a las que tendría que realizarse la oxidación si esta fuera una simple combustión. Y al ser requerida una temperatura inferior a la de una combustión convencional, se consumirán además menores cantidades de combustible de apoyo. En base a esto, con un catalizador apropiado la reacción procede más rápido.

Los catalizadores dependen para su actividad, cuando menos en parte, de la extensión de su área superficial, para que resulten efectivos, la mayoría de los catalizadores sólidos deben tener áreas superficiales del orden de 5 a $1000m^2/g$, por consiguiente los catalizadores sólidos casi siempre son porosos. Por lo general la actividad de un catalizador disminuye con el tiempo. En el desarrollo de un nuevo proceso catalítico. La vida del catalizador suele ser una consideración económica muy importante, el paro de un proceso y de las unidades auxiliares de separación y preparación para regenerar o reemplazar un catalizador resulta prohibitiva excepto a intervalos muy largos. En muchos casos se han descubierto sustancias catalíticas que han tenido que descartarse debido a que resulta imposible mantener su actividad y la regeneración no era practica. Por tanto, es importante comprender como pierden su actividad los catalizadores. En algunos sistemas, la actividad catalítica disminuye tan lentamente, que sólo se requiere regenerar o sustituir el catalizador después de un periodo de meses o años. La disminución de la actividad se debe a los *venenos*, que se definen como sustancias que disminuyen la actividad del catalizador y que se encuentran en los reactantes o se producen en

la reacción. Por ejemplo, la regeneración frecuente de los catalizadores en los tratamientos de gas de cola por abajo del punto de rocio es necesaria debido a la acumulación de azufre en el lecho catalítico. La disminución lenta de la actividad casi siempre se debe a la quimisorción de reactantes, productos o impurezas de la corriente. La desactivación rápida es causada por la deposición física de una sustancia que bloquea los *centros activos del catalizador*.

Las características generales de los catalizadores pueden resumirse como:

- Un catalizador acelera la reacción al proporcionar otros posibles mecanismos para la formación de productos, siendo la energía de activación de cada etapa cataliticamente, inferior a la de la reacción homogénea (no catalítica).
- En el ciclo de la reacción, los centros de catálisis activos se combinan cuando menos con un reactante y quedan libres al aparecer el producto. El centro liberado se puede recombinar con otro reactante para producir otro ciclo, y así sucesivamente.
- Se requieren cantidades de centros catalíticos comparativamente pequeñas para formar grandes cantidades del producto.
- La conversión de equilibrio no es alterada por la catálisis, cualquier catalizador que acelere la reacción directa en un sistema en equilibrio también cataliza la reacción inversa.
- El catalizador puede afectar radicalmente a la selectividad.

Los catalizadores que se utilizan normalmente en la oxidación catalítica están constituidos por metales, como ya se mencionó generalmente se necesitan cantidades pequeñas de metal y de óxidos metálicos para obtener la mayor superficie de contacto posible con la corriente gaseosa.

Hay dos compuestos usados como catalizadores para el proceso Claus, en el cual el dióxido de azufre reacciona con el ácido sulfhídrico para dar azufre elemental y agua: la alumina y el dióxido de titanio. La *alumina* de una gran área superficial es generalmente usada como Catalizador Claus, ya que es eficiente y adecuada por contener un alto número de sitios catalíticamente activos, capaces de llevar a cabo la reacción Claus, y con esto lograr la generación de azufre elemental, el problema con ella es que su exposición con el dióxido de azufre y oxígeno puede guiar a la formación de superficies de sulfato de alumina, lo cual conduciría a una pérdida de éste catalizador (y para poder eliminar el sulfato de este catalizador, se tendría que calentar a temperaturas mayores a las cuales se esta trabajando en el reactor). Por otra parte el *dióxido de titanio*, también es muy eficiente, ya que su superficie hace que reaccione rápidamente el dióxido de azufre y oxígeno, además la hidrólisis del CS_2 y el COS se realiza más rápidamente sobre este catalizador. La actividad catalítica depende tanto de las propiedades físicas y químicas del catalizador, como de las condiciones operacionales. El daño en alguna de estas propiedades causaría una reducción de la actividad, ya que el rendimiento del lecho catalítico depende de la temperatura, presión, concentración de reactivos y productos y tiempo de residencia.
La sulfatación es otro problema que reduce el área superficial, promoviendo así la desactivación del catalizador

Por lo anterior, el primer lecho catalítico además de contener la alumina, también tiene una capa o capas de dióxido de titanio dependiendo de la concentración del disulfuro de carbono y sulfuro de carbonilo.

En la primera etapa Claus, se tienen que conservar temperaturas altas para destruir el COS y CS_2, al pasar por una capa de TiO_2 y obtener una mayor recuperación, y en la siguiente etapa la temperatura tiene que ser menor, para cumplir con la química de las reacciones. Para aumentar la conversión a azufre elemental dos o tres reactores catalíticos Claus con recalentadores y condensadores de azufre son utilizados. El numero de etapas es determinado por la economía y la necesidad de cumplir con las regulaciones ambientales

El analizador de H_2S es necesario, para permitir un ajuste adecuado de flujo de aire (ya que con esto se puede lograr fácilmente, la relación optima para las etapas catalíticas como se mencionó en la descripción de la sección térmica). Este analizador se localizara en la línea de proceso, a la salida del último convertidor Claus, antes de entrar al convertidor Superclaus.

5.1.2.2 1 Termodinámica y Cinética de la Etapa Catalítica

La cinética química es aquella rama de la físico-química que estudia la velocidad de las reacciones. Una pregunta de importancia que la termodinámica no plantea, es: ¿Con qué rapidez se lleva a cabo una reacción?.

La termodinámica considera únicamente las relaciones de energía entre los reactivos y los productos de una reacción, sin intentar señalar la rapidez con la que se alcanza el equilibrio.

La cinética complementa a la termodinámica al proporcionar información de la velocidad de transformación de reactivos en productos. Por otra parte, algunas reacciones son tan lentas que para observar un cambio visible en ellas, es necesario el transcurso de meses o aún de años, a la temperatura ordinaria. Como se observó anteriormente la velocidad de una reacción depende de diversas variables, entre las que también se encuentra la presencia de un catalizador, y la radiación, es decir, longitud de onda determinada.

Reacciones químicas en equilibrio: Como se sabe muchas reacciones no realizan su transformación al 100%, sino que proceden hasta cierto punto y se detienen, dejando con frecuencia cantidades considerables de reactivos inalterados. Cuando una reacción alcanza este estado, se dice que se encuentra en *equilibrio*, por lo cual no se puede apreciar un nuevo cambio en la composición con el transcurso del tiempo, cuando se encuentra aislado de sus alrededores. Pero no debe considerarse esto como un estado en que cesa todo movimiento, sino que es más provechoso considerarlo como un estado en el cual la velocidad con que desaparecen los reactivos originando productos es exactamente igual a la de interacción de los productos que restablecen las sustancias reaccionantes.

Cuando sobre un sistema químico en equilibrio se ejerce una acción exterior que modifica las condiciones del sistema, el equilibrio se desplaza en el sentido que tienda a contrarrestar la perturbación introducida. Esta acción puede ser el *Efecto de la temperatura, presión y*

composición, los cuales son descritos a partir del principio de LE CHATELIER-BRAUN, el cual predice cualitativamente el efecto de la variación de presión, o de la temperatura sobre un sistema de equilibrio, y establece que siempre que actúa una fuerza sobre un equilibrio, éste reaccionara en una dirección que tiende a contrarrestar la fuerza aplicada. Es decir, cuando una reacción es endotérmica absorbe calor, y la adición de éste la favorece por lo cual la reacción tendrá lugar más fácilmente a temperaturas elevadas. Por el contrario si es exotérmica, debemos esperar que la adición de calor tienda a inhibirla, y de aquí que a altas temperaturas tiende a proceder en sentido inverso. Lo mismo pasa con la presión y la concentración.

Las reacciones en equilibrio se ilustran de la siguiente forma. Considérese una reacción general perfectamente reversible, en la cual las sustancias reaccionantes son A, B y los productos de la reacción son C, D y sus respectivos coeficientes estequiómetricos son a, b, c, y d, de esta forma:

$$a\,A + b\,B \longleftrightarrow c\,C + d\,D$$

Como la velocidad de reacción directa es proporcional a las concentraciones molares de A y B, elevados a sus coeficientes estequiometricos a y b, ahora bien siendo k1 la constante de proporcionalidad para la reacción directa resulta:

$$\text{Velocidad de la reacción directa} = k1 C_A^{\,a} C_B^{\,b}$$

Análogamente la velocidad de reacción inversa es proporcional a las concentraciones molares de C y D, elevados a sus coeficientes estequiometricos c y d, luego si k2 es la constante de proporcionalidad para la reacción inversa resulta:

$$\text{Velocidad de la reacción inversa} = k2 C_C^{\,c} C_D^{\,d}$$

Y cuando se alcanza el estado en equilibro, la velocidad de reacción directa e inversa deben ser iguales de modo que:

$$k1 C_A^{\,a} C_B^{\,b} = k2 C_C^{\,c} C_D^{\,d}$$

donde los valores de las concentraciones, se refieren al equilibrio. Reagrupando se ve que:

$$\frac{k1}{k2} = K = \frac{C_C^c \times C_D^d}{C_A^a \times C_B^b}$$

siendo K la constante de equilibrio de la reacción.

Cuando se usa el término K_C para designar la constante, se hace referencia ha las concentraciones molares por unidad de volumen, y cuando se usa K_P los términos se reemplazan por las correspondientes presiones parciales. Debe hacerse notar que las

ecuaciones se aplican sólo a sistemas que involucran gases ideales. Para gases reales, la concentración efectiva (o presión parcial) debe ser reemplazada por la actividad, o fugacidad ó coeficiente de fugacidad.

$$K_P = \frac{P_C^c \times P_D^d}{P_A^a \times P_B^b}$$

Ahora se toma el caso de la reacción Claus, aunque hay un gran número de reacciones en la conversión de H_2S a S, la conversión total se representa como:

$$H_2S + 1/2\,O_2 \longrightarrow 1/x\,S_{x\,(VAPOR)} + H_2O$$

La cual para dar una explicación química se considera que se encuentra en equilibrio.

En donde la velocidad de reacción directa es: $k1(P_{H2S})\,(P_{O2})^{1/2}$

Y la velocidad de reacción inversa es: $k2(P_{Sx})^{1/x}\,(P_{H2O})$

Entonces en el equilibro quedaría: $k1(P_{H2S})(P_{O2})^{1/2} = k2(P_{Sx})^{1/x}\,(P_{H2O})$

de esta manera

$$\frac{k1}{k2} = K_P = \frac{(P_{Sx})^{1/x} \times (P_{H2O})}{(P_{H2S}) \times (P_{O2})^{1/2}}$$

Los valores de k1 y k2 son profundamente influenciados por la temperatura, aunque no tengan la misma magnitud. Así mismo, la constante de equilibrio también depende de la temperatura. Como la conversión de eficiencia a cada temperatura la constante K tendrá un valor definido que dependerá de la naturaleza de la reacción. Por ejemplo si el equilibrio de la reacción directa se encuentra hacia el lado de los productos a una temperatura dada, como es el caso de la reacción Claus que entre 250-300 °c la concentración de azufre se incrementa (figura 5.1) en cambio, si la temperatura es grande la concentración de azufre es pequeña, y se deduce que en el equilibrio la magnitud de la reacción inversa predomina sobre la directa.

Los valores de k1 y k2 son las constantes de velocidad para las dos reacciones a una temperatura dada. Cuando el H_2S y O_2 reaccionan, sus presiones parciales decrecen, mientras que las del S y H_2O se incrementa; entonces la reacción hacia la derecha empieza a hacerse lenta y la reacción reversible se acelera hasta que eventualmente alcanza un punto en el cual las velocidades son iguales. El primer estudio real, termodinámico de este equilibrio fue realizado en 1953 por Gamson y Elkins, quienes realizaron una gráfica que expresa la

dependencia de la temperatura con la conversión de equilibrio de la mezcla estequiométrica (figura 5.1), donde la región izquierda de la curva representa el equilibrio entre el H_2S y el O_2 en la sección catalítica.

Como la presión parcial de cada componente es proporcional a sus concentraciones molares, a una baja concentración molar su presión también es baja. La figura 5.1 muestra que la proporción de S_8 disminuye con un incremento en la temperatura en favor de S_6, S_7, S_5 y especialmente S_2, y por lo tanto la presión parcial del S se incrementa muy rápidamente con el aumento en la temperatura, promoviendo la reacción reversible. La reacción catalítica se lleva a cabo a bajas temperaturas; en la gráfica donde la temperatura es muy baja, la reacción es progresivamente más lenta. Hasta alrededor de 350°c, es muy lenta para un uso práctico. Pero a esta temperatura se logra la mejor producción teórica (asumiendo que el sistema ha alcanzado el equilibrio). La función del catalizador es extender la baja temperatura (es decir tener un rango amplio de ésta temperatura), sobre el cual la reacción tenga lugar a una velocidad satisfactoria para conseguir la más alta conversión posible. El catalizador no tiene influencia en la última posición del equilibrio, solamente en la velocidad con la cual se efectúa. Dado el que equilibrio esta en función de la presión parcial de cada componente del gas, si la presión parcial de alguno de ellos es perturbada, el valor del resto se ajusta para alcanzar el valor del equilibrio.
No es posible incrementar la eficiencia de la conversión usando un exceso de O_2 porque aunque una gran proporción de H_2S reacciona, esto logra formar más SO_2 que azufre. La conversión es sin embargo favorecida si hay una gran concentración de H_2S y esto además se incrementa, si el contenido de N_2 del aire de combustión es reducido o eliminado totalmente. Además como el H_2O es un producto de la reacción Claus, una alta carga de humedad en la alimentación tiene un efecto nocivo en la eficiencia de conversión. Una afortunada característica del sistema de reacción es que uno de los productos, el S es mucho menos volátil que los otros constituyentes y puede por lo tanto ser removido fácilmente por condensación. Esto reduce su presión parcial considerablemente, después si el gas remanente es recalentado y pasa a través de un catalizador, ello reacciona para producir más S. También desde que la carga de azufre en los gases de reacción es reducida en cada etapa, los sucesivos convertidores catalíticos pueden ser operados progresivamente a menores temperaturas, fuera del peligro de deposición de azufre en el catalizador. *Este es el principio en el cual es basado prácticamente el diseño de las plantas Claus.*

Auque esta reacción que se maneja aquí, no es la que netamente se lleva a cabo en los convertidores, da una idea clara de cómo se realiza la reacción de conversión en la sección catalítica para la recuperación de azufre, ya que se comparta de la misma forma, pero para asegurar que se lleve a cabo la reacción se divide en dos, llevándose a cabo la primera en el Reactor Principal, y la segunda con mayor forma en la sección catalítica.

Tomando en consideración esto se muestra la reacción intermedia, en la cual el equilibrio de la reacción depende de la oxidación y reducción.

En principio una *Base de Lewis* es una especie química que puede donar un par de electrones. Y un *Ácido de Lewis* es una especie química que puede aceptar un par de electrones.
El H_2S es un buen agente reductor pudiéndose oxidar a S elemental o a SO_2 dependiendo de la condiciones:

con exceso de oxígeno $2\,H_2{}^{+2}S^{-2} + O_2{}^{0} \longrightarrow 2\,S^{0} + 2\,H_2O$

con deficiencia de oxígeno $2\,H_2{}^{+2}S^{-2} + 3\,O_2{}^{0} \longrightarrow 2\,S^{+4}O_2{}^{-4} + 2\,H_2O$

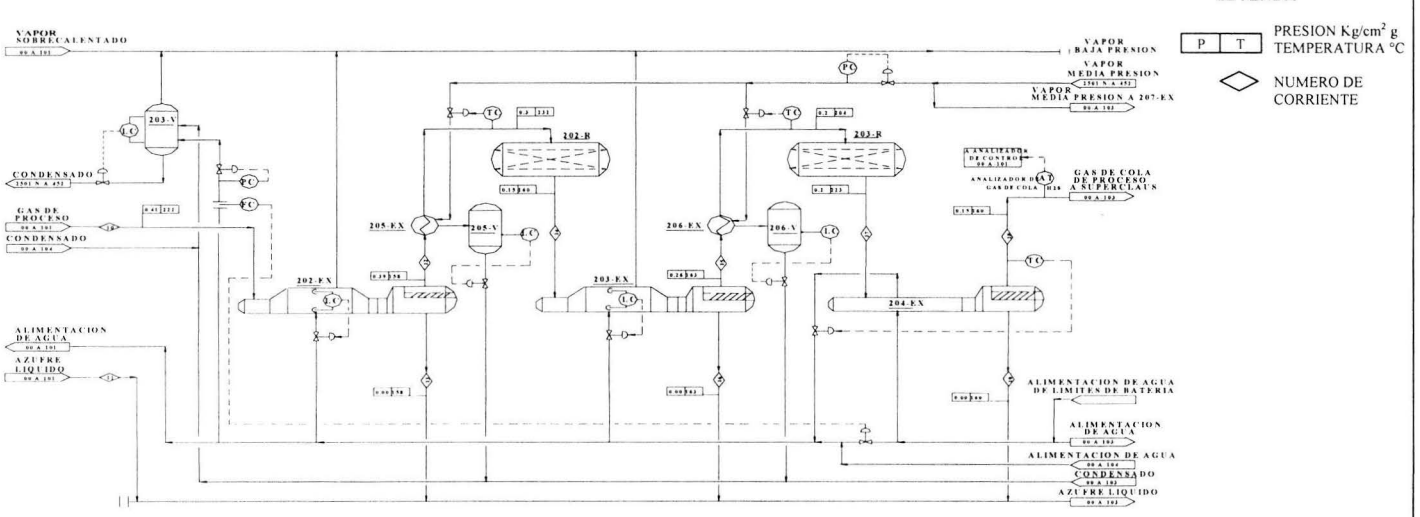
En disoluciones ácidas el estado de oxidación +4 del azufre tiende a reducirse, como es en el caso del SO_2.

$$2\,H_2{}^{+2}S^{-2} + S^{+4}O_2{}^{-4} \longrightarrow 3/2\,S_2{}^{0} + 2\,H_2O$$

Esta es la reacción intermedia Claus en la cual las especies de azufre tienden a reducirse o a oxidarse dependiendo del sentido de la reacción.
El S^0 tiende a reducirse en medio ácido, pero a oxidarse en medio básico, por lo cual el agua a veces actúa como base o como ácido.
Y el S^{-2} actúa como agente reductor en medio básico, (ya que el SO_2 es un ácido de Lewis, sin embargo también puede actuar como base, ya que conserva un par de electrones solitarios) y en su forma de H_2S no es tan estable como el O_2, de hecho se puede oxidar a cualquiera de los estados de oxidación superiores positivos generando S^0.

La temperatura de salida de los convertidores determina la conversión de equilibrio; Como se pudo observar la constante de equilibrio esta relacionada con la velocidad de las reacciones, por lo cual la cinética hace uso de la constante de equilibrio de reacción para poder decir que si la velocidad es lenta hacia el sentido que se refiera. Por todo esto se dice que la reacción es limitada termodinámica y cinéticamente, ya que es una reacción que esta en equilibrio. De tal manera que se tiene que trabajar bajo un cierto intervalo de temperaturas por el lado de la termodinámica y con cierto catalizador por el lado de la cinética, para obtener los resultados deseados.

203-V	202-EX	205-EX	205-V	202-R
TANQUE DE CONDENSANDO	CONDENSADOR DE AZUFRE No.1	RECALENTADOR No.1	TANQUE DE CONDENSANDO No.1	REACTOR CATALÍTICO No.1
Dimen. 1016mm DI X 3048mm T/T	Carga Térmica 1.59 X 1E6 kcal/hr	Carga Térmica 1.59 X 1E6 kcal/hr	Dimen. 1016mm DI X 3048mm T/T	Dimen. 3734mm DI X 15240mm T/T
203-EX	**206-EX**	**206-V**	**203-R**	**204-EX**
CONDENSADOR DE AZUFRE No.2	RECALENTADOR No.2	TANQUE DE CONDENSANDO No.2	REACTOR CATALÍTICO No.2	CONDENSADOR DE AZUFRE No.3
Carga Térmica 3.8 X 1E6 kcal/hr	Carga Térmica 0.86 X 1E6 kcal/hr	Dimen. 1016mm DI X 3048mm T/T	Dimen. 3734mm DI X 15240mm T/T	Carga Térmica 1.8 X 1E6 kcal/hr



Rev		Aprob	Rev	UNAM	PLANTA RECUPERADORA DE AZUFRE	NUEVO PEMEX TABASCO		DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE SRU ETAPA CLAUS	REV
						No. De Proyecto	Nuevo Pemex		
A	Preliminar	LFCR	KCV			CV-5500	Tabasco	DIAGRAMA NUMERO: 77051-C-A-102	A

Diagrama 5.2

5.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO SUPERCLAUS

Para gases ácidos con menos del 10% de H_2S el usual recurso es una oxidación directa sobre un catalizador (una adecuada temperatura es lograda precalentando ambos el aire y el gas ácido).

Después del proceso Claus, sigue el tratamiento de gas de cola Superclaus, por medio del cual se obtiene una recuperación del 99%. El gas de proceso que abandona el último condensador Claus se calentara en el Tercer Recalentador de vapor de media presión (207-EX), éste gas recalentado se mezclara con aire, también precalentado para llevar a cabo la oxidación (una mezcla adecuada entre el gas de proceso y el aire se logra en el Mezclador Estático) (201-MX), después esta mezcla entrara al Convertidor Superclaus (204-RSC), (Diagrama 5.3). Aquí el H_2S se oxida directamente a azufre elemental.

El nuevo catalizador Superclaus es la clave del paso de la oxidación. Aproximadamente un 85% del H_2S es oxidado directamente a azufre; el catalizador es un oxido de metal, el cual es química y térmicamente estable, tiene buena resistencia mecánica.
Nótese que en la etapa térmica, el porcentaje de conversión es mejorado por las altas temperaturas. Y en la región catalítica el porcentaje de conversión mejora con una reducción en la temperatura, además en ambas secciones la reacción Claus es limitada termodinámicamente. Aquí la reacción de oxidación no es limitada por el equilibrio, la reacción es:

$$3\,H_2S + 3/2\,O_2 \longrightarrow 3/n\,S_{(VAPOR)} + 3\,H_2O$$

Las etapas de la reacción son las siguientes:

$$\begin{array}{rrcll} & H_2S + 3/2\,O_2 & \longrightarrow & SO_2 + H_2O & \text{reacción 1} \\ + & 2\,H_2S + SO_2 & \longleftrightarrow & 3/x\,S_x + 2\,H_2O & \text{reacción 2} \\ \hline & 3H_2S + 3/2\,O_2 & \longrightarrow & 3/x\,S_x + 3\,H_2O & \text{reacción 3} \end{array}$$

Por lo cual se dice que esta última es la reacción neta Claus, y es la que se lleva a cabo en la etapa Superclaus, como ya se vio la reacción 1 se realiza en el Rector Principal y la reacción 2 en la sección térmica y principalmente en la sección catalítica, la cual es limitada termodinámica y cinéticamente porque se encuentra en equilibrio. La reacción resultante como es de oxidación directa no es limitada por el equilibrio.
En esta parte del proceso se realiza netamente la reacción Claus, por lo cual la termodinámica y la cinética que se describieron en la sección catalítica si se realizan aquí de esa forma.

En el convertidor SUPERCLAUS se utiliza un catalizador especial (un oxido metálico) para la oxidación selectiva. Esta reacción es termodinámicamente completa y por lo tanto se pueden obtener altos niveles de conversión a azufre elemental.

Algunas características únicas del catalizador SUPERCLAUS son:

- La oxidación del H_2S a azufre elemental es completa.
- Ninguna sensibilidad al vapor de agua
- Los componentes tales como H_2, CO y otros combustibles no se ven alterados.
- El catalizador no establece la reacción del equilibrio Claus.

Van den Brink observó que al incrementar la temperatura la selectividad disminuía y la conversión a H_2S incrementaba, ya que el equilibrio bajo estas condiciones se desplaza hacia el lado izquierdo de la reacción. Por lo tanto se espera una alta conversión a azufre a bajas temperaturas en el reactor Superclaus.
El aire se suministra en exceso para mantener condiciones oxidantes en el convertidor y prevenir la sulfatación del catalizador. Por esta razón, el flujo de aire suministrado es controlado. El punto de ajuste del controlador de flujo es determinado por el gas total alimentado (gas ácido total, más el aire de combustión) y la concentración de H_2S en el gas de cola antes de entrar en la etapa Superclaus. La temperatura de entrada al convertidor Superclaus se mantiene a 210°c. Además también se debe tener un control en la temperatura del reactor, ya que si la temperatura de salida del convertidor excede de 300°c, la producción de azufre disminuye debido a un incremento en la formación de SO2.

El proceso SUPERCLAUS operará de acuerdo a una filosofía distinta. En este proceso la proporción de aire–gas ácido se ajustará para alcanzar una proporción H_2S–SO_2 mayor de 2/1.

La filosofía de control puede resumirse como:

(1) si la concentración de H_2S entrante al convertidor SUPERCLAUS es muy alta, se agregará más aire al quemador para crear más SO_2, o
(2) si la concentración del H_2S entrante al convertidor SUPERCLAUS es muy baja, se disminuye aire al quemador.

El gas que deja el convertidor pasara por el Condensador Superclaus (208-EX), en donde se enfriara, éste ultimo condensador debe operar a la menor temperatura posible, para poder condensar la mayor cantidad de azufre; generando de esta manera vapor de 15psig, la presión de vapor utilizada en este condensador se controla para que entre de 1.0kg/cm^{2}g (que corresponde a una temperatura de vapor de 119°c, la cual esta ligeramente arriba de la temperatura de solidificación del azufre) a 1.5kg/cm^{2}g (que corresponde a una temperatura de vapor de 127°c), arriba de 127°c, demasiado vapor de azufre permanece en el gas, reduciendo la recuperación global.

Después el gas que sale del condensador será enviado a un Filtro Coalescedor (202-V) para remoción de gotas de azufre.
La niebla de azufre resulta de la condensación de la corriente de proceso en la superficie de la tubería y es causada por una excesiva velocidad de transferencia de calor en los condensadores o por un largo gradiente térmico que cruza el diámetro de la tubería de proceso. Una vez formada la neblina no puede ser fácilmente removida de la corriente de proceso ya que las partículas son muy pequeñas para recolectarlas con malla o con coalescedor empacado.
El rocío de azufre debe ser formado por el crecimiento de las partículas de la neblina o por la entrada de gotitas desde las paredes del tubo a la corriente de proceso, por la excesivamente alta velocidad del gas. El rocío de azufre puede ser removido de la corriente del gas de proceso por su tamaño propiamente, con una instalación apropiada de malla o coalescedor.

Una vez que el gas de proceso abandona el coalescedor, el gas pasara al Oxidador Térmico (el gas de cola de la etapa Superclaus y el gas de venteo de las fosas de azufre contienen H_2S residual, el cual no debe ser descargado directamente a la atmósfera) (201-H) donde se quemara con gas combustible para la conversión de cualquier compuesto de azufre remanente a SO_2, y de esta forma poder ser descargado el gas residual a la atmósfera. Los gases calientes que salen del oxidador, se descargan a la atmósfera a través de la Chimenea (202-L). La cual tiene frecuentemente una altura de 200 pies o más, y una velocidad suficiente, de modo que a nivel del suelo las concentraciones de dióxido de azufre estén por debajo de los valores de seguridad.

Una vez términado el proceso Superclaus en el último condensador. El azufre recuperado de los condensadores, será enviado a una zona de desgasificación, en donde será tratado para poderlo transportar, y de esta forma terminar el ciclo del tratamiento.

207-EX
RECALENTADOR No.3
Carga Térmica 1.56 X 1E6 kcal/hr

201-H
QUEMADOR DEL OXIDADOR TERMICO
Dimen. 3350mm DI X 9145mm L

211-EX
RECALENTADOR DE AIRE SUPERCLAUS
Carga Térmica 0.05 X 1E6bkcal/hr

202-K/KA
SOPLADOR DE AIRE DE TIRO FORZADO
Cap. 37625.4 MCSH @ 0.56 kg/cm g

202-V
COALESCEDOR DE AZUFRE
Dimen. 2286mm X 6706mm T/T

204-RSC
REACTOR CATALÍTICO SUPERCLAUS
Dimen. 4268mm DI X 15 240mm T/T

202-L
CHIMENEA
Dimen. 45.720mm

208-EX
CONDENSADOR DE AZUFRE SUPERCLAUS
Carga Térmica 3.22 X 1E6 kcal/hr

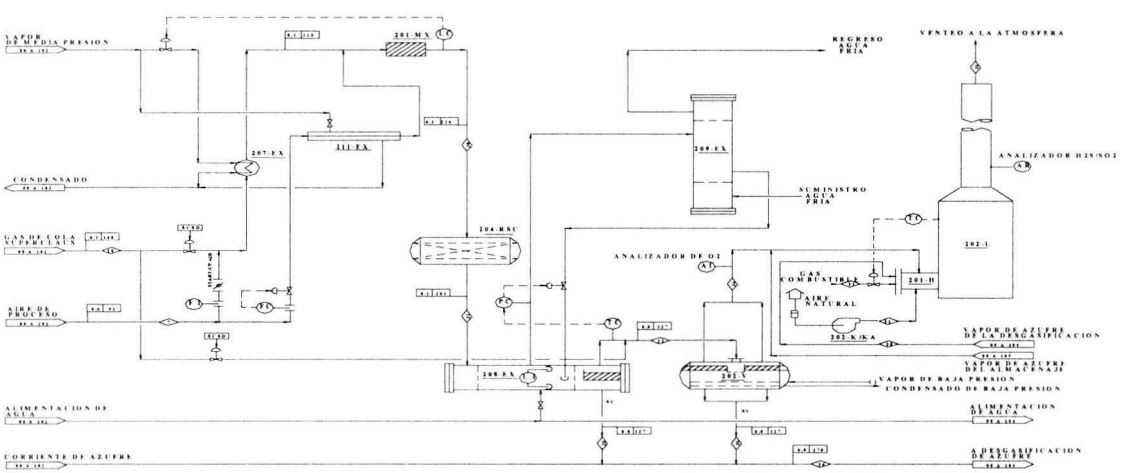
209-EX
CONDENSADOR DE VAPOR DE 15 PSIG
Carga Térmica. 3.70 X 1E6 kcal/hr

201-MX
MEZCLADOR ESTATICO

LEYENDA

P | T — PRESION Kg/cm² g, TEMPERATURA °C

NUMERO DE CORRIENTE



REV		Aprob	Rev	UNAM	PLANTA RECUPERADORA DE AZUFRE	NUEVO PEMEX TABASCO		DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE SRU REACTOR SUPERCLAUS	REV
A	Preliminar	LFCR	KCV			No. De Proyecto	Nuevo Pemex	DIAGRAMA NUMERO: 77051-C-A-103	A
						CV-5500	Tabasco		

Diagrama 5.3

5.3 PROCESO DE DESGASIFICACIÓN DE AZUFRE SHELL

La desgasificación ayuda a purificar de alguna manera el azufre, pero no existe un método general para esto, el tratamiento depende de la naturaleza y de la concentración de las impurezas, así como del uso que se le vaya a dar al azufre, un simple mecanismo puede ser por fundición y sedimentación, pero es mucho mejor filtrar el azufre fundido en una malla de alambre, si éste se obtiene sólido.

La desgasificación se realiza debido a que el azufre líquido producido en las Plantas Claus contiene un poco de H_2S y polisulfuros de hidrógeno. Lo cual puede causar una alta cantidad de toxicidad durante el manejo y transportación, además de explosividad en tanques de almacenamiento. Los polisulfuros se descomponen en H_2S y azufre como resultado de una disminución en la temperatura y el H_2S se desorbe del azufre debido a la agitación, bajo estas condiciones el ácido sulfhídrico es emitido y acumulado en forma de gas por encima del azufre líquido La solubilidad del H_2S en el azufre líquido es mayor a altas temperaturas que a menores (Figura 5.4). Esto es debido a la formación de polisulfuros de hidrógeno, y al débil limite de compuestos poliméricos de H_2S a S:

$$H_2S + (x-1)S \longrightarrow H_2S_X$$

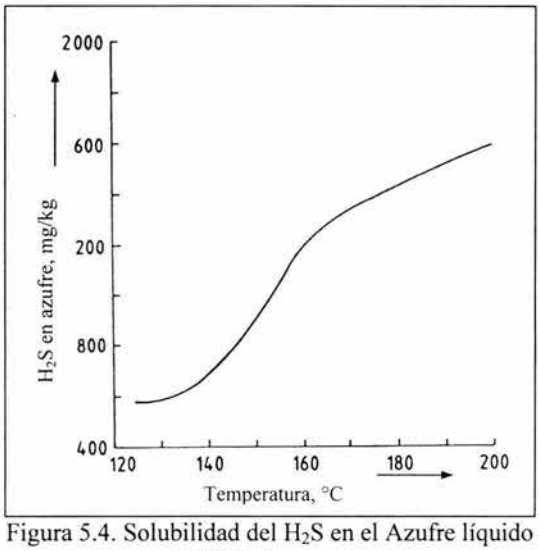


Figura 5.4. Solubilidad del H_2S en el Azufre líquido a 100kPas.

El azufre producido en las diferentes etapas de la Planta Claus tiene distintas concentraciones de ácido sulfhídrico (H_2S/H_2S_x); por ejemplo en la etapa térmica es de 500-700 mg/kg de

azufre. Pero esta concentración decrece después de cada Reactor Catalítico, debido principalmente a la disminución de la presión parcial del H_2S. En general la concentración H_2S/H_2S_x en el azufre producido de toda la planta es de un promedio de 250-300 mg/kg. En el almacenaje esta relación cambia dependiendo del tiempo de residencia y de la temperatura, cuando el tiempo de residencia es mayor de 12hrs, se asume que el equilibrio esta siendo alcanzado (a 150°c la relación es aproximadamente 50% H_2S y 50% H_2S_x.).
El incremento del H_2S en el azufre líquido con un incremento en la temperatura puede ser interpretado por la formación de H_2S_x a muy altas temperaturas y cinéticamente podría ser acelerada por la formación de átomos S_x a temperaturas mayores de 150°c.

Las cinco principales razones para desgasificar el azufre son:

1) Menor toxicidad del producto líquido durante su manejo y transportación.
2) Minimizar el peligro explosivo del H_2S liberado del producto líquido.
3) Menor corrosión del producto líquido.
4) Reducir las emisiones de H_2S a la atmósfera.

La desgasificación se lleva a cabo mediante el proceso de desgasificación Shell, el cual reduce el contenido de H_2S a menos de 10 ppm en peso.

Lo cual se realiza en la Fosa de Desgasificación (201-L), en donde el azufre procedente de los condensadores se introducirá a través del enfriador de azufre (210-EX-1) para reducir la temperatura, ya que sin enfriamiento la viscosidad, es muy alta para desgasificar. La desgasificación se obtiene inyectando aire a través de las cuatro Columnas (203-EM-1/2/3/4) que se encuentran dentro de la fosa, las columnas de arrastre están abiertas en la parte de arriba y de abajo estas columnas tiene unos difusores (spargers) en la parte de abajo para que circule aire dentro del azufre líquido El diseño de la columna es para que el azufre circule a través de ella unos cientos de veces por hora (el azufre es el que principalmente se eleva).

Cuando la temperatura del azufre decrece, los polisulfuros tienden a descomponerse y H_2S es liberado como resultado de la agitación (este ácido sulfhídrico es emitido y acumulado en forma de gas en el espacio que esta encima del azufre líquido), una parte del H_2S disuelto en el azufre líquido es arrastrado por el aire, y la otra se oxida a azufre elemental. El gas usado en la columna debe ser aire y no N_2, CO_2, o algún otro tipo de gas, ya que pueden contener poco o nada de oxígeno. Y la presencia de oxígeno disminuye el contenido de ácido sulfhídrico en el azufre líquido, probablemente por una oxidación directa del H_2S disuelto. Esto origina una disminución del contenido de H_2S a menos del 1.5%vol (abajo del "limite explosivo" del ácido sulfhídrico en el aire, que es de 3.5% vol).

El gas de barrido (conteniendo el ácido sulfhídrico liberado) de la fosa será removido por el Eductor de Vapor (202-EM-1) y descargado hacia el Incinerador. El azufre desgasificado fluirá sobre una compuerta en la fosa. A otro compartimiento, de donde será bombeado el

producto, por medio de la Bomba de Azufre (202-P/PA), para transportarlo o almacenarlo o para tener un nivel constante en el pozo y así mantener la inundación adecuada en la columna de arrastre (Figura 5.5).
De esta manera se obtiene azufre con un contenido menor a las 10ppm (peso) de H_2S para ser almacenado y transportado.

Una vez descrito el proceso Claus y Superclaus, a continuación se muestran los resultados del balance de masa a las condiciones de operación, así como los resultados de la prueba de desempeño.

Falta página

N° 75

6. RESULTADOS DE LA PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN DE LA PLANTA

A continuación se muestran los resultados del arranque, así como las condiciones de operación de la planta, por medio del balance de materia y de los resultados de la prueba de desempeño.

La Planta Recuperadora de Azufre esta garantizada recuperar el 98.5% del azufre contenido como H_2S en el gas ácido de alimentación.
Adicionalmente se garantiza que los gases de salida, producidos en el oxidador térmico tendrán un contenido máximo de 10ppm (peso) de H_2S.

6.1 RESULTADOS DEL ARRANQUE DE LA PLANTA

Algunos problemas durante el arranque:

26 de noviembre de 2003: Se encendió el oxidador térmico para iniciar calentamiento del reactor térmico, por procedimiento se requieren 48hrs para obtener la temperatura de operación. A las 15:00hrs se encendió el oxidador térmico y posteriormente el reactor térmico.

28 de noviembre de 2003: A las 10:50hrs se inició la carga de gas ácido, 14:00hrs la carga de gas se aumentó hasta lectura en tablero, 18:50hrs se continuó con gas ácido.

02 de diciembre de 2003: Se ajustó detector de flama ultravioleta para gas de combustión y para gas ácido. El Reactor Térmico se calentara hasta 500°c (se aumentarón 50°c cada hora), arriba de 500°c aumentar 100°c cada hora, 11:30hrs se encendió incinerador. A las 14:00hrs soplador con motor en servicio. A las 16:00hrs probando ignición del reactor térmico.

03 de diciembre de 2003: A las 10:00hrs horno caliente 1250°c, se inició alimentación de gas ácido. Disparo de planta. Dos horas después se reinició alimentación de gas ácido.

05 de diciembre de 2003: Se solicitó análisis de gas de cola al laboratorio. Se realizó una comparación con analizadores. Reactores catalíticos 1 y 2 con deposito en cama, se reducirá con exceso de H_2S.

06 de diciembre de 2003: A las 9:00hrs, en servicio se planteó revisar análisis donde están instalados detectores de H_2S. La compañía encargada del proceso recomienda que los trabajadores de área usen detectores portátiles. Nuevamente se disparo la planta, falló de incinerador por posible taponamiento por hidratos.

08 de diciembre de 2003: Se disparó unidad y se rearrancó en automático, antes de abrir se aumentó aire para quemar el azufre que permanecia en la cama (atm. oxidante). A las 15:30hrs recuperación en Claus de 95.2%.

09 de diciembre de 2003: Se disparó la planta 1 a las 7:30hrs por bajo nivel de agua en caldereta al "hacer" nivel en planta 2.
10 de diciembre de 2003: Ayer planta en automático, aire a un inéstable, aire en cascada. Se revisarón válvulas de aire. Se fijó arranque en automático, se afino el factor de carga de aire. Se intentara poner en servicio analizador si todo esta bien. Se arrancó Superclaus. Diferencias en la lectura de carga. En la noche Superclaus llegó a 180°c y se aumentó aire al máximo. Máxima capacidad se corre la planta por dos horas.

11 de diciembre de 2003: Salió de operación planta de azufre 1, por retrazo en planta endulzadora.

22 de diciembre de 2003: Superclaus operando al 98.6% de recuperación.

Un mes después. Cierre de la prueba de desempeño.

La Prueba de Desempeño es una corrida de prueba por un período de veinticuatro horas para demostrar que el desempeño garantizado ha sido logrado en la planta.

Actividades realizadas para la prueba de desempeño:

- Los equipos de laboratorio deben estar disponibles e instalados como sea necesario para realizar las pruebas de desempeño.
- Debe haber personal de laboratorio disponible.
- Debe haber personal de operaciones disponible.
- Toda la instrumentación deberá ser calibrada, afinada y aprobada.
- Los análisis de la alimentación del gas ácido y del gas de combustión de periodos previos a la prueba de comportamiento deben estar disponibles.
- Las hojas de registro del periodo previo a la prueba de desempeño deben estar disponibles.
- Preparación de hojas de registro para la prueba de desempeño.
- La planta debe estar bajo condiciones estables en la alimentación por lo menos 24 horas antes de la prueba de desempeño.

Ya que las SRU's tendrán una capacidad de procesamiento de gas ácido de 27.743 mmpcd, cada una de las unidades obtendrá una recuperación de azufre de 400 TMPD aproximadamente.

RESULTADOS DE LA PRUEBA DE DESEMPEÑO

	mmpcd	kgmol/hr	08:30	12:00	16:00	20:00	00:00	04:00	08:00	24 HORAS
Gas Acido Humedo	27.743	**1316.400**	**20.500**	**20.790**	**22.250**	**22.140**	**22.000**	**22.000**	**21.980**	21.666
Aire Princ. + fino	27.467	**1303.285**	**21.020**	**19.940**	**21.120**	**21.800**	**21.450**	**21.880**	**21.380**	21.227
Aire Superclaus	2.448	**116.135**	**2.190**	**2.110**	**2.120**	**2.090**	**2.110**	**2.130**	**2.240**	2.141
Aire(Total)	29.915	1419.420	*23.210*	*22.050*	*23.240*	*23.890*	*23.560*	*24.010*	*23.620*	23.369
Gas Acido (B.S)%MOL										
N2	**0.0000**		**0.0800**	**0.0900**	**0.1300**	**0.0800**	**0.1100**	**0.0600**	**0.1100**	0.094
H2S	**37.6000**		**47.5800**	**47.3600**	**48.7300**	**47.8800**	**49.5900**	**51.2500**	**48.2600**	48.664
CO2	**61.5950**		**52.0000**	**52.2300**	**50.8300**	**51.7400**	**49.9100**	**48.3800**	**51.3200**	50.916
CH4	**0.6250**		**0.2600**	**0.2500**	**0.2400**	**0.2300**	**0.3200**	**0.2400**	**0.2400**	0.254
C2H6	**0.1200**		**0.0800**	**0.0700**	**0.0700**	**0.0700**	**0.0700**	**0.0700**	**0.0700**	0.071
C3H8	**0.0600**		**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	0.000
H2O	**0.0000**		**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	0.000
Total	*100*		*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	100.000
Gas Acido (B.H)%MOL										
N2	0.0000	**0.000**	0.072	0.074	0.105	0.068	0.089	0.050	0.090	0.078
H2S	39.4161	**518.873**	42.862	39.072	39.507	40.942	40.233	42.588	39.498	40.672
CO2	52.9347	**696.833**	46.843	43.090	41.210	44.243	40.493	40.203	42.002	42.583
CH4	0.5799	**7.634**	0.234	0.206	0.195	0.197	0.260	0.199	0.196	0.212
C2H6	0.1100	**1.448**	0.072	0.058	0.057	0.060	0.057	0.058	0.057	0.060
C3H8	0.0600	**0.790**	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H2O	6.8993	**90.822**	9.917	17.500	18.927	14.490	18.869	16.902	18.157	16.394
Total	*100.000*	*1316.4*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	100.000

		kgmol/hr	08:30	12:00	16:00	20:00	00:00	04:00	08:00	24 HORAS
Gas de cola (B.S)%MOL										
H2S	0.0322		**0.0300**	**0.0300**	**0.0100**	**0.0100**	**0.0100**	**0.0100**	**0.0100**	0.016
SO2	0.2299		**0.2300**	**0.2200**	**0.2500**	**0.1500**	**0.1400**	**0.0800**	**0.1700**	0.016
COS	0.0084		**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	0.177
CS2	0.0203		**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	**0.0000**	0.000
CO2	39.7100		**33.6900**	**33.6400**	**33.3200**	**33.6600**	**32.1700**	**31.6700**	**34.4700**	0.000
N2	59.9992		**66.0500**	**66.1100**	**66.4200**	**66.1800**	**67.6800**	**68.2400**	**65.3500**	33.231
Total	*100.000*		*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	66.576
Gas de cola (B.H)%MOL										
H2S	0.023	**0.555**	0.022	0.022	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.011
SO2	0.166	**3.96**	0.168	0.161	0.182	0.109	0.102	0.058	0.124	0.011
COS	0.006	**0.144**	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.129
CS2	0.015	**0.35**	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CO2	28.697	**683.917**	24.590	24.554	24.317	24.568	23.481	23.116	25.160	0.000
N2	43.360	**1033.355**	48.210	48.254	48.473	48.305	49.400	49.808	47.699	24.255
H2O	27.733	**660.942**	**27.010**	**27.010**	**27.021**	**27.010**	**27.010**	**27.010**	**27.010**	48.593
Total	*100.000*	*2383.223*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	27.012
Aire (B.S)%MOL										
N2	**79.000**		**79.000**	**79.000**	**79.000**	**79.000**	**79.000**	**79.000**	**79.000**	
O2	**21.000**		**21.000**	**21.000**	**21.000**	**21.000**	**21.000**	**21.000**	**21.000**	
Ar	**0.000**		**0.000**	**0.000**	**0.000**	**0.000**	**0.000**	**0.000**	**0.000**	
Total	*100.000*		*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

			08:30	12:00	16:00	20:00	00:00	04:00	08:00	24 HORAS
Aire (B.H)%MOL										
N2	75.579		**76.533**	**76.533**	**76.533**	**76.533**	**76.533**	**76.322**	**76.322**	
O2	20.091		**20.344**	**20.344**	**20.344**	**20.344**	**20.344**	**20.288**	**20.288**	
Ar	0.000		**0.000**	**0.000**	**0.000**	**0.000**	**0.000**	**0.000**	**0.000**	
H2O	4.331		**3.122**	**3.122**	**3.122**	**3.122**	**3.122**	**3.390**	**3.390**	
Total	*100.000*		*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	*100.000*	
Cálculo de Humedad										
Gas Acido										
Temp. (°C)	**49.000**		**55.300**	**66.860**	**69.370**	**63.480**	**69.490**	**67.050**	**68.640**	65.741
Pres.(Kg/cm2)	**1.730**		**0.608**	**0.549**	**0.600**	**0.610**	**0.614**	**0.619**	**0.616**	0.602
Humedad Relativa	**100.000**		**100.000**	**100.000**	**100.000**	**100.000**	**100.000**	**100.000**	**100.000**	100.000
Ln(Vp)	2.462		2.770	3.302	3.412	3.151	3.417	3.310	3.380	3.249
VP(Kpa)	11.734		15.964	27.157	30.313	23.350	30.472	27.386	29.365	26.287
VP(Psi)	1.702		2.316	3.939	4.397	3.387	4.420	3.972	4.259	3.813
% H2O	4.331		9.917	17.500	18.927	14.490	18.869	16.902	18.157	16.394
Aire										
Temp. (°C)	**35.000**		**31.110**	**31.110**	**31.110**	**31.110**	**31.110**	**31.110**	**31.110**	31.110
Pres.(Kg/cm2)	**0.000**		**0.000**	**0.000**	**0.000**	**0.000**	**0.000**	**0.000**	**0.000**	0.000
Humedad Relativa	**65.000**		**70.000**	**70.000**	**70.000**	**70.000**	**70.000**	**76.000**	**76.000**	71.714
Ln(Vp)	1.727		1.509	1.509	1.509	1.509	1.509	1.509	1.509	1.509
VP(Kpa)	5.622		4.520	4.520	4.520	4.520	4.520	4.520	4.520	4.520
VP(Psi)	0.816		0.656	0.656	0.656	0.656	0.656	0.656	0.656	0.656
% H2O	3.606		3.122	3.122	3.122	3.122	3.122	3.390	3.390	3.199

			08:30	12:00	16:00	20:00	00:00	04:00	08:00	24 HORAS
Cálculos										
Entrada de azufre										
H2S(mmpcd)	10.935		8.787	8.123	8.790	9.065	8.851	9.369	8.682	8.810
S° (Ton/día)	399.237		320.789	296.564	320.923	330.936	323.149	342.061	316.953	321.625
S° Kg-mol/día	12451.256		10004.652	9249.124	10008.832	10321.116	10078.254	10668.066	9885.019	10030.723
S° Kg-mol/Hr	518.802		416.860	385.380	417.035	430.047	419.927	444.503	411.876	417.947
Entrada de N2										
N2(mmpcd)	22.609		17.763	16.876	17.786	18.284	18.031	18.325	18.027	17.870
N2 (Ton/día)	721.582		566.929	538.594	567.661	583.538	575.478	584.849	575.350	570.343
N2 (Kg-mol/día)	25743.192		20225.781	19214.928	20251.924	20818.351	20530.780	20865.122	20526.205	20347.585
N2 (Kg-mol/Hr)	1072.633		842.741	800.622	843.830	867.431	855.449	869.380	855.259	847.816
			08:30	12:00	16:00	20:00	00:00	04:00	08:00	24 HORAS
Salida de N2										
N2 (mmpcd)			0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
N2 (Ton/día)	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
N2 (Kg-mol/día)	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
N2 (Kg-mol/Hr)	1072.633		842.741	800.622	843.830	867.431	855.449	869.380	855.259	847.816
Gas cola										
H2S (Kg-mol/hr)	0.576		0.383	0.363	0.127	0.131	0.126	0.127	0.131	0.198
SO2 (Kg-mol/hr)	4.111		2.935	2.664	3.176	1.966	1.770	1.019	2.225	2.251
COS (Kg-mol/hr)	0.149		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CS2 (Kg-mol/hr)	0.363		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CO2 (kg-mol/hr)	709.913		429.855	407.396	423.313	441.187	406.616	403.477	451.121	423.281
N2 (kg-mol/hr)	1072.633		842.741	800.622	843.830	867.431	855.449	869.380	855.259	847.816
TOTAL	*1787.745*		1275.914	1211.045	1270.446	1310.715	1263.962	1274.004	1308.735	1273.546

			08:30	12:00	16:00	20:00	00:00	04:00	08:00	24 HORAS
Vapor de Azufre										
Temperatura(°C)	**127.000**		**129.940**	**130.010**	**130.020**	**130.010**	**132.870**	**128.250**	**129.680**	**130.111**
Presión(Kg/cm2)	0.016		**0.030**	**0.030**	**0.030**	**0.030**	**0.030**	**0.030**	**0.030**	**0.030**
log(Vp)	-4.171		-4.096	-4.094	-4.094	-4.094	-4.023	-4.139	-4.103	-4.092
Vp	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S vapor (%mol)	0.007		0.008	0.008	0.008	0.008	0.009	0.007	0.008	0.008
Sv (Kg-mol/hr)	1.258		1.041	0.992	1.041	1.073	1.220	0.942	1.052	1.052
% Recuperación	**98.685**		98.955	98.957	98.958	99.263	99.258	99.530	99.173	99.156
TPD (S recuperado)	393.989		317.435	293.471	317.580	328.496	320.751	340.454	314.331	318.931

■ **Datos originales del Balance de Materia** ■ **Datos tomados durante la Prueba de Desempeño**

En base a la misma tabla y a las mismas mediciones de fluidos, pero usando los valores de salida del Condensador 3 (último condensador Claus), se puede observar la recuperación de azufre que se tendría si solamente el proceso Claus fuera utilizado.

PRUEBA DE DESEMPEÑO CLAUS.

	mmpcd	kgmol/hr
Gas Acido Humedo	27.743	**1316.400**
Aire Princ. + fino	27.467	**1303.285**
Aire Superclaus	2.448	**116.135**
Aire(Total)	29.915	1419.420
Gas Acido (B.S)%MOL		
N2	**0.0000**	
H2S	**37.6000**	
CO2	**61.5950**	
CH4	**0.6250**	
C2H6	**0.1200**	
C3H8	**0.0600**	
H2O	**0.0000**	
Total	*100*	
Gas Acido (B.H)%MOL		
N2	0.0000	**0.000**
H2S	39.4161	**518.873**
CO2	52.9347	**696.833**
CH4	0.5799	**7.634**
C2H6	0.1100	**1.448**
C3H8	0.0600	**0.790**
H2O	6.8993	**90.822**
Total	*100.000*	*1316.4*
		kgmol/hr
Gas de cola (B.S)%MOL		
H2S	1.1346	
SO2	0.1078	
COS	0.0087	
CS2	0.0212	
CO2	41.4327	
N2	57.2949	
Total	*100.000*	

Gas de cola (B.H)%MOL		
H2S	0.818	**18.728**
SO2	0.078	**1.78**
COS	0.006	**0.144**
CS2	0.015	**0.35**
CO2	29.871	**683.88**
N2	41.306	**945.7**
H2O	27.906	**638.89**
Total	*100.000*	*2289.472*
Aire (B.S)%MOL		
N2	**79.000**	
O2	**21.000**	
Ar	**0.000**	
Total	*100.000*	
Aire (B.H)%MOL		
N2	75.579	
O2	20.091	
Ar	0.000	
H2O	4.331	
Total	*100.000*	
Cálculo de Humedad		
Gas Acido		
Temp. (°C)	**49.000**	
Pres.(Kg/cm2)	**1.730**	
Humedad Relativa	**100.000**	
Ln(Vp)	2.462	
VP(Kpa)	11.734	
VP(Psi)	1.702	
% H2O	4.331	
Aire		
Temp. (°C)	**35.000**	
Pres.(Kg/cm2)	**0.000**	
Humedad Relativa	**65.000**	
Ln(Vp)	1.727	
VP(Kpa)	5.622	
VP(Psi)	0.816	
% H2O	3.606	

Cálculos		
Entrada de azufre		
H2S(mmpcd)	10.935	
S° (Ton/día)	399.237	
S° Kg-mol/día	12451.256	
S° Kg-mol/Hr	518.802	
Entrada de N2		
N2(mmpcd)	22.609	
N2 (Ton/día)	721.582	
N2 (Kg-mol/día)	25743.192	
N2 (Kg-mol/Hr)	1072.633	
Salida de N2		
N2 (mmpcd)		
N2 (Ton/día)	0.000	
N2 (Kg-mol/día)	0.000	
N2 (Kg-mol/Hr)	1072.633	
Gas cola		
H2S (Kg-mol/hr)	21.242	
SO2 (Kg-mol/hr)	2.019	
COS (Kg-mol/hr)	0.163	
CS2 (Kg-mol/hr)	0.397	
CO2 (kg-mol/hr)	775.671	
N2 (kg-mol/hr)	1072.633	
TOTAL	*1872.125*	
Vapor de Azufre		
Temperatura(°C)	**127.000**	
Presión(Kg/cm2)	0.016	
log(Vp)	-4.171	
Vp	0.000	
S vapor (%mol)	0.007	
Sv (Kg-mol/hr)	1.320	
% Recuperación	**95.078**	
TPD (S recuperado)	379.585	

En esta tabla se puede ver que la recuperación de azufre se define como:

$$\mathbf{SR} = \frac{\mathbf{SF - STG}}{\mathbf{SF}} \times \mathbf{100\%} \quad \text{donde}$$

SR = Recuperación de azufre (kgmol/hr).
SF = Azufre presente en la alimentación de gas ácido (kgmol/hr).
STG = Azufre presente en el gas de cola a la salida del coalescedor (kgmol/hr).

$$\text{SF (kgmol/hr)} = \frac{\text{S GAS (kgmol/día)}}{24} \quad ; \quad \text{S GAS (kgmol/día)} = \frac{\text{S GAS (TON/día)} \times 1000}{32.064}$$

$$\text{S GAS (TON/día)} = \frac{\dfrac{\text{H}_2\text{S GAS (mmpcd)}}{398.79} \times 32.064}{2202.3} \times 1000000$$

$$\text{H}_2\text{S GAS (mmpcd)} = \frac{\text{GAS (mmpcd)} \times \text{H}_2\text{S GAS (B.H)}}{100}$$

S GAS (kgmol/día) = Azufre en la alimentación de gas ácido (kgmol/día).
S GAS (TON/día) = Azufre en la alimentación de gas ácido (TON/día).
H_2S GAS (mmpcd) = H_2S en la alimentación de gas ácido (mmpcd).
GAS (mmpcd) = Gas ácido húmedo (mmpcd).
H_2S GAS (B.H) = H_2S en la alimentación de gas ácido (Base Húmeda %mol).

$$\text{STG (kgmol/hr)} = (S_c + Sv)$$

Sc = Azufre contenido en los compuestos del gas de cola a la salida del coalescedor (kgmol/hr).
Sv = Vapor de azufre a la salida del coalescedor (kgmol/hr).

$$Sc = H_2S\,COLA\,(kgmol/hr) + SO_2\,COLA\,(kgmol/hr) + COS\,COLA\,(kgmol/hr) + 2 \times CS_2\,(kgmol/hr)$$

$$H_2S\,COLA\,(kgmol/hr) = \frac{H_2S\,COLA\,(B.S)}{100} \times \frac{N_2\,SAL\,(kgmol/hr)}{\frac{N_2\,COLA\,(B.S)}{100}}$$

$$SO_2\,COLA\,(kgmol/hr) = \frac{SO_2\,COLA\,(B.S)}{100} \times \frac{N_2\,SAL\,(kgmol/hr)}{\frac{N_2\,COLA\,(B.S)}{100}}$$

$$COS\,COLA\,(kgmol/hr) = \frac{COS\,COLA\,(B.S)}{100} \times \frac{N_2\,SAL\,(kgmol/hr)}{\frac{N_2\,COLA\,(B.S)}{100}}$$

$$CS_2\,COLA\,(kgmol/hr) = \frac{CS_2\,COLA\,(B.S)}{100} \times \frac{N_2\,SAL\,(kgmol/hr)}{\frac{N_2\,COLA\,(B.S)}{100}}$$

$$N_2\,SAL\,(kgmol/hr) = N_2\,ENT\,(kgmol/hr) = \frac{N_2\,ENT\,(kgmol/día)}{24}$$

$$N_2\,ENT\,(kgmol/día) = \frac{N_2\,ENT\,(TON/día) \times 1000}{28.03}$$

$$N_2\,ENT\,(TON/día) = \frac{\frac{N_2\,ENT\,(mmpcd)}{398.79} \times 28.03}{2202.03} \times 1E6$$

$$N_2\,ENT\,(mmpcd) = \frac{Aire\,total\,(TMPD) \times N_2\,AIRE\,(B.H)}{100}$$

$$Aire\,total\ (TMPD) = (Aire\,principal + fino\,(TMPD)) + Aire\,SCR\,(TMPD)$$

$$N_2\ AIRE\ (B.H) = \frac{N_2\ AIRE\ (B.S)}{100} \times (100 - H_2O\ AIRE\ (B.H))$$

$$H_2O\ AIRE\ (B.H) = \%H_2O\ AIRE = HR\ (AIRE) \times \frac{VP\ AIRE\ (psi)}{(P\ AIRE\ (kg/cm^2) \times 14.22) + 14.7}$$

$$VP\ AIRE\ (psi) = \frac{VP\ AIRE\ (kpa)}{6.894}$$

$$VP\ AIRE\ (kpa) = EXP\ (ln\ (Vp\ AIRE))$$

$$ln\ Vp\ AIRE = 18.6866 + (-0.00243724) \times (T\ AIRE + 273.15) + \frac{-4509.47}{T\ AIRE + 273.15} + \frac{-149541}{(T\ AIRE + 273.15)^2}$$

H_2S COLA (kgmol/hr) = H_2S en el gas de cola (kgmol/hr).
SO_2 COLA (kgmol/hr) = SO_2 en el gas de cola (kgmol/hr).
COS COLA (kgmol/hr) = COS en el gas de cola (kgmol/hr).
CS_2 COLA (kgmol/hr) = CS_2 en el gas de cola (kgmol/hr).

H_2S COLA (B.S) = H_2S en el gas de cola Base Seca %mol.
SO_2 COLA (B.S) = SO_2 en el gas de cola Base Seca %mol.
COS COLA (B.S) = COS en el gas de cola Base Seca %mol.
CS_2 COLA (B.S) = CS_2 en el gas de cola Base Seca %mol.
N_2 COLA (B.S) = N_2 en el gas de cola Base Seca %mol.

N_2 SAL (kgmol/hr) = N_2 en el gas de cola (kgmol/hr).

N_2 ENT (kgmol/hr) = N_2 en la entrada (kgmol/hr).
N_2 ENT (kgmol/día) = N_2 en la entrada (kgmol/día).
N_2 ENT (TON/día) = N_2 en la entrada (TON/día).
N_2 ENT (mmpcd) = N_2 en la entrada (mmpcd).

Aire SCR (TMPD) = Aire a Superclaus (TMPD).
Aire Principal + fino (mmpcd) = Aire a Reactor Térmico más el aire a Desgasificación (mmpcd).

N_2 AIRE (B.H) = N_2 del aire en Base Húmeda %mol.

H_2O AIRE (B.H) = H_2O del aire en Base Húmeda %mol.

N_2 AIRE (B.S) = N_2 del aire en Base Seca %mol.

HR (AIRE) = Húmedad Relativa del aire.
VP AIRE (psi) = Presión de vapor del aire (psi).
VP AIRE (kpa) = Presión de vapor del aire (kpa).
P AIRE (kg/cm^2) = Presión del aire (kg/cm^2).
ln Vp AIRE = Logaritmo natural de la presión de vapor del aire.
T AIRE = Temperatura del aire en °c.

$$Sv\,(kgmol/hr) = \frac{Sv\,\%mol}{100} \times 7.65 \times \frac{N_2\,SAL\,(kgmol/hr)}{\frac{N_2\,COLA\,(B.H)}{100}} \quad ; \quad Sv\,\%mol = \frac{Vp\,S}{1 + Ps\,(kg/cm^2)} \times 100$$

$$Vp\,S = 10^{\log Vp\,S} \quad ; \quad \log Vp\,S = 6.0489 - \frac{4087.8}{273.15 + T\,S}$$

Sv (kgmol/hr) = Vapor de azufre (kgmol/hr).
Sv %mol = Vapor de azufre (%mol).
Vp S = Vapor de azufre.
Ps (kg/cm^2) = Presión de azufre.
T S = Temperatura de azufre en °c.

La conversión y la recuperación no son iguales. La *recuperación* es siempre menor que la conversión por dos razones:

- El vapor de azufre elemental producido en los convertidores es recuperado por condensación en forma líquida, el azufre que sale del condensador en fase vapor no es recuperado.
- Muy frecuentemente azufre líquido en forma de neblina o niebla salen de la corriente del condensador y por lo tanto no es recuperado.

La *conversión* es la cantidad de azufre elemental producido relativamente de los compuestos que contienen azufre en la corriente de entrada (usualmente H_2S).

De acuerdo con las pruebas de comportamiento la planta es capaz de alcanzar los requerimientos medidos garantizados. Durantes las pruebas de comportamiento a la capacidad

de diseño y a la máxima capacidad se cumplió con la eficiencia de recuperación de azufre garantizada de 98.5% (el promedio de la eficiencia de recuperación es de 99.2%). La concentración de H_2S medida en el gas de la chimenea fué de 9ppm mientras que la concentración máxima garantizada era de 10 ppm.

6.2 CONDICIONES DE LA OPERACIÓN DE LA PLANTA

A continuación se muestran los resultados del Balance de Materia en donde se pueden ver, las condiciones de operación de la Planta.

BALANCE DE MATERIA

NUMERO DE CORRIENTE	1	2	3	4	5	7
DESCRIPCION	ALIMENTACION DE GAS ACIDO	GAS ACIDO A REACTOR TERMICO	FLUJO DIVIDIDO DE GAS ACIDO	ALIMENTACION TOTAL DE AIRE	AIRE A REACTOR TERMICO	AIRE A SUPERCLAUS
H2S	518.873	456.608	62.265			
SO2						
COS						
CS2						
S2						
S6						
S8						
AZUFRE LIQUIDO, S1						
CO						
H2						
CO2	696.833	613.213	83.620	0.412	0.3630	0.034
O2				287.425	253.712	23.517
N2				1071.361	945.698	87.657
Ar				12.760	11.263	1.044
H2O	90.822	79.923	10.899	47.462	41.895	3.833
CH4	7.634	6.178	0.916			
C2H6	1.448	1.274	0.174			
C3H8	0.790	0.695	0.095			
TOTAL (kgmol/hr)	1316.4	1158.432	157.969	1419.42	1252.931	116.135
FLUJO MASICO (kg/hr)	50186	44164	6022	40595	35834	3321
TEMPERATURA (°c)	49	49	49	93	93	93
PRESION (kg/cm2)	1.733	1.678	1.678	1.617	1.617	1.617
DENSIDAD (kg/m3)	2.422	2.342	2.342	1.489	1.489	1.489
PESO MOLECULAR (kg/kgmol)	38.12	38.12	38.12	28.6	28.6	28.6
CALOR ESPECIFICO (kcal/kg °c)	0.23	0.23	0.23	0.25	0.25	0.25

BALANCE DE MATERIA

NUMERO DE CORRIENTE	8	9	10	11	12	13
DESCRIPCION	AIRE A AZUFRE DESGASIFICADO	GAS DE PROCESO DEL RECUP. DE CALOR	GAS DE PROCESO A CONDENSADOR No.1	AZUFRE LIQUIDO DEL RECUP. DE CALOR	GAS DE PROCESO DEL CONDENSADOR No.1	AZUFRE LIQUIDO DEL CONDENSADOR No.1
H2S		88.450	150.715	0.023	150.671	0.044
SO2		81.501	81.501		81.501	
COS		14.440	14.440		14.440	
CS2		7.000	7.000		7.000	
S2						
S6		6.280	6.280		0.121	
S8		15.449	15.499		0.543	
AZUFRE LIQUIDO, S1		14.912	14.912	81.990	15.187	155.914
CO		24.170	24.170		24.170	
H2		13.871	13.871		13.871	
CO2	0.015	579.319	662.939		662.939	
O2	10.196					
N2	38.006	945.698	945.698		945.698	
Ar	0.453	11.263	11.263		11.263	
H2O	1.684	496.144	507.043		507.043	
CH4			0.916		0.916	
C2H6			0.174		0.174	
C3H8			0.095		0.095	
TOTAL (kgmol/hr)	50.354	2298.497	2456.466	82.013	2435.632	155.958
FLUJO MASICO (kg/hr)	1440	77367	83397	2629	78379	5001
TEMPERATURA (°c)	93	243	222	243	158	158
PRESION (kg/cm2)	1.617	1.444	1.444	1.034	1.419	1.034
DENSIDAD (kg/m3)	1.489	1.112	1.151	1768.608	1.229	1773.200
PESO MOLECULAR (kg/kgmol)	28.6	33.66	33.95	32.06	32.18	32.06
CALOR ESPECIFICO (kcal/kg °c)	0.25	0.26	0.26	0.24	0.26	0.24

BALANCE DE MATERIA

NUMERO DE CORRIENTE	14	15	16	17	18	19
DESCRIPCION	GAS DE PROCESO DEL CONVERTIDOR CLAUS No.1	GAS DE PROCESO DEL CONDENSADOR No.2	AZUFRE LIQUIDO. DEL CONDENSADOR No.2	GAS DE PROCESO DEL CONVERTIDOR CLAUS No.2	GAS DE PROCESO DEL CONDENSADOR No.3	AZUFRE LIQUIDO. DEL CONDENSADOR No.3
H2S	48.742	48.687	0.055	18.743	18.728	0.015
SO2	16.752	16.752		1.780	1.780	
COS	0.144	0.144		0.144	0.144	
CS2	0.350	0.350		0.350	0.350	
S2						
S6	15.617	0.175		2.477	0.162	
S8	15.101	0.758		6.201	0.719	
AZUFRE LIQUIDO, S1		12.441	194.923		3.465	54.276
CO	24.170	24.170		24.170	24.170	
H2	13.871	13.871		13.871	13.871	
CO2	683.883	683.883		683.883	683.883	
O2						
N2	945.698	945.698		945.698	945.698	
Ar	11.263	11.263		11.263	11.263	
H2O	608.949	608.949		638.892	638.892	
CH4	0.916	0.916		0.916	0.916	
C2H6	0.174	0.174		0.174	0.174	
C3H8	0.095	0.095		0.095	0.095	
TOTAL (kgmol/hr)	2385.725	2368.327	194.978	2348.657	2344.310	54.291
FLUJO MASICO (kg/hr)	78395	72139	6252	72127	70400	1741
TEMPERATURA (°c)	314	163	163	223	160	160
PRESION (kg/cm2)	1.346	1.288	1.034	1.220	1.187	1.034
DENSIDAD (kg/m3)	0.889	1.061	1771.900	0.894	0.968	1772.500
PESO MOLECULAR (kg/kgmol)	32.86	30.46	32.06	30.71	30.03	32.06
CALOR ESPECIFICO (kcal/kg °c)	0.27	0.27	0.24	0.28	0.28	0.24

BALANCE DE MATERIA

NUMERO DE CORRIENTE	20	21	22	23	24	25
DESCRIPCION	GAS DE PROCESO A CONVERTIDOR SUPERCLAUS	GAS DE PROCESO DEL CONVERTIDOR SUPERCLAUS	GAS DE PROCESO DEL CONDENSADOR SUPERCLAUS	AZUFRE LIQUIDO. DEL CONDENSADOR SUPERCLAUS	GAS DE PROCESO DEL COALESCEDOR GAS DE COLA	AZUFRE LIQUIDO. DEL COALESCEDOR GAS DE COLA
H2S	18.728	0.562	0.555	0.007	0.555	
SO2	1.780	3.960	3.960		3.960	
COS	0.144	0.144	0.144		0.144	
CS2	0.350	0.350	0.350		0.350	
S2						
S6	0.489	1.827	0.022		0.022	
S8	0.908	1.903	0.127		0.127	
AZUFRE LIQUIDO, S1			1.415	23.528	0.090	1.413
CO	24.170	24.170	24.170		24.170	
H2	13.871	13.871	13.871		13.871	
CO2	683.917	683.917	683.917		683.917	
O2	23.517	12.254	12.254		12.254	
N2	1033.355	1033.355	1033.355		1033.355	
Ar	12.307	12.307	12.307		12.307	
H2O	642.775	660.942	660.942		660.942	
CH4	0.916	0.916	0.916		0.916	
C2H6	0.174	0.174	0.174		0.174	
C3H8	0.095	0.095	0.095		0.095	
TOTAL (kgmol/hr)	2457.496	2450.747	2448.574	23.535	2447.249	1.413
FLUJO MASICO (kg/hr)	73725	73718	72968	755	72904	45
TEMPERATURA (°c)	210	261	127	127	127	127
PRESION (kg/cm2)	1.137	1.080	1.052	1.034	1.041	1.034
DENSIDAD (kg/m3)	0.833	0.719	0.930	1797.800	0.923	1797.800
PESO MOLECULAR (kg/kgmol)	30.00	30.08	29.80	32.06	29.79	32.06
CALOR ESPECIFICO (kcal/kg °c)	0.28	0.28	0.27	0.23	0.27	0.23

BALANCE DE MATERIA

NUMERO DE CORRIENTE	26	27A	28A	29A	30
DESCRIPCION	AZUFRE TOTAL PRODUCIDO A ENFRIAMIENTO	AIRE DE BARRIDO A PRIMER FOSA DE DESGASIFICACION	CORRIENTE DE BARRIDO DE LA FOSA	VAPOR DE BAJA PRESIÓN A EDUCTOR	DESCARGA DEL EDUCTOR A OXIDADOR TERMICO
H2S	0.145				0.049
SO2					
COS					
CS2					
S2					
S6					0.002
S8					0.009
AZUFRE LIQUIDO, S1	512.066				0.041
CO					
H2					
CO2		0.013			0.041
O2		9.347			28.844
N2		34.839			107.684
Ar		0.415			1.282
H2O		1.543		55.509	115.878
CH4					
C2H6					
C3H8					
TOTAL (kgmol/hr)	512.211	46.157		55.509	253.830
FLUJO MASICO (kg/hr)	16423	1320		1000	6087
TEMPERATURA (°c)	170	30		148	131
PRESION (kg/cm2)	1.034	1.027		4.590	1.090
DENSIDAD (kg/m3)	1776.618	1.142		2.310	0.785
PESO MOLECULAR (kg/kgmol)	32.06	28.60		18.02	23.98
CALOR ESPECIFICO (kcal/kg °c)	0.24	0.24		0.55	0.32

BALANCE DE MATERIA

NUMERO DE CORRIENTE	31	32	33	57
DESCRIPCION	GAS COMBUSTIBLE A OXIDADOR TERMICO	AIRE DE COMBUSTION A OXIDADOR TERMICO	GAS INCINERADO DEL OXIDADOR TERMICO	AGUA DE ENFRIAMIENTO A CONDENSADOR DE AZUFRE
H2S			0.031	
SO2			6.678	
COS			0.008	
CS2			0.029	
S2				
S6				
S8				
AZUFRE LIQUIDO, S1				
CO			21.121	
H2			3.847	
CO2	0.042	0.359	797.935	
O2		250.592	64.623	
N2	1.940	934.067	2077.045	
Ar		11.124	24.713	
H2O		41.380	1042.930	537.549
CH4	97.720			
C2H6	4.677			
C3H8	0.482			
TOTAL (kgmol/hr)	104.861	1237.522	4038.960	537.549
FLUJO MASICO (kg/hr)	1786	35391	116120	9684
TEMPERATURA (°c)	35	40	725	121
PRESION (kg/cm2)	3.141	1.034	1.033	7.011
DENSIDAD (kg/m3)	2.046	1.113	0.351	942.586
PESO MOLECULAR (kg/kgmol)	17.03	28.60	28.75	18.02
CALOR ESPECIFICO (kcal/kg °c)	0.52	0.24	0.33	1.02

En éste balance se puede ver, que como la corriente de gas ácido en la alimentación tiene una composición de menos del 50% de H_2S, se usa la configuración de flujo dividido, (ya que como se vió se recomienda realizar esto en tal caso) pero también se mencionó que la fracción del bypass se realiza en base a los resultados de operación, por lo cual aquí se maneja una fracción de bypass del 12% y el resto, el 88% de la alimentación se envían directamente al reactor térmico. También se puede observar que la cantidad de aire enviada al quemador es la adecuada, ya que a la salida del reactor térmico hay suficiente H_2S:SO_2 para conseguir la relación deseada de 2:1 a las etapas catalíticas, y a la entrada del reactor Superclaus la concentración de H_2S es de 0.64% volumen, lo cual es adecuado para la operación de los Reactores Claus y Superclaus.

Ahora bien en la primera etapa catalítica, existe la limitación de la hidrólisis del COS y CS_2, por lo tanto aquí la conversión no es muy grande, ya que la temperatura de salida es de 314°c la cual se encuentra en el rango de hidrólisis de 314-340°c, y una temperatura inferior tendría un gran efecto decreciente en la recuperación del azufre, por lo cual la temperatura de entrada a esta etapa debe ser mayor que en las demás para ayudar a lograr este efecto; y es aquí en la sección catalítica, es en donde ya se lleva "totalmente" la reacción Claus.

A la salida del Reactor Térmico la relación H_2S:SO_2 es la ideal para la reacción Claus, pero solamente en el rango de la sección catalítica como se ve en la gráfica de la representación del proceso, ya que en este intervalo de temperatura el valor de la constante de equilibrio es mayor hacia el lado de la producción de azufre; ya que la corriente de gas de proceso que abandona el Reactor Principal se une con la cantidad de gas ácido que fue enviado por el bypass, con esto se consigue la relación 2:1 (que es la apropiada para el proceso Claus) y una gran recuperación de azufre, pero esta relación va aumentando con el paso por los reactores, así como la concentración va disminuyendo; y a medida que la relación se va desproporcionando mas, pues la recuperación va siendo menor, ya que en la segunda etapa catalítica la relación es de 10:1, por lo cual se consigue una recuperación menor. Bueno a pesar de todo esto es en el Reactor Superclaus, en donde se lleva a cabo toda la recuperación posible ya que se mantienen condiciones oxidantes al introducir la mayor cantidad de O_2, para que se produzca directamente el azufre elemental.

Como se puede observar las temperaturas de los condensadores se mantienen al margen de la temperatura de condensación del azufre, ya que debajo de esta el azufre podría solidificar causando problemas operacionales.

Como ya se mencionó se tiene un especial cuidado en las temperaturas de operación ya que son muy importantes, debido a los componentes que se manejan en el proceso. Ya que por ejemplo el azufre tiene una viscosidad muy variable, ésta se incrementa de 10cp a 100,000cp a 160–188°c y por encima de 188°c la viscosidad disminuye. Por lo cual todas las temperaturas del gas de proceso ya sea que se encuentren por debajo de 160°c o por encima de 188°c, para no provocar ningún tipo de problema debido a ésto.

Retomando el capítulo de las selección del proceso y en base a los resultados obtenidos, a continuación se muestra el análisis de costos del proceso CBA y Superclaus.

7. ANÁLISIS DE COSTOS

A continuación se realiza el análisis de costos entre los procesos preseleccionados (CBA y SUPERCLAUS). En el cual se puede observar porque conviene utilizar el Tratamiento de Gas de Cola Superclaus en la recuperación de azufre, respecto a la inversión adicional; ya que estos tratamientos se adicionan a plantas tanto nuevas como existentes.

7.1 COMPARACION DE LOS COSTOS ANUALES EQUIVALENTES DE LOS PROCESOS CBAY SUPERCLAUS

Cuando dos alternativas de proceso, generan los mismos ingresos, ahorros o beneficios, para compararlos se deben juzgar de acuerdo a sus valores anuales negativos o más apropiadamente de acuerdo a sus costos anuales equivalentes.
Se consideró un periodo de 8 años, así como la pérdida de producción por paro de planta programado, para poner en igualdad de condiciones ambos procesos.
Los mayores costos son por:

	CBA	Superclaus
	USD	USD
LICENCIA	198 000	266 000
CATALIZADOR	560 000 (Se requiere cambiar cada 2 años, 140 000 por cada cambio)	1 275 000 (Se requiere cambiar cada 8 años)
COSTO POR VALVULAS	1 500 000 (Se requieren 10 válvulas)	300 000 (Se requieren 2 válvulas)

Tabla 7.1. Costos más representativos de los procesos.

	CBA	Superclaus
	USD	USD
INVERSION	36 282 000	35 972 000
MANTENIMIENTO	192 000 (Se requiere realizar por 3 días cada 2 años, debido al número de válvulas).	42 000 (Se requiere realizar por 3 días cada 8 años.)
COSTOS OPERATIVOS	900 429	595 406
PERDIDA DE PRODUCCIÓN (PARO PROGRAMADO) 3 DIAS	32 884 000 (Se requiere realizar cada 2 años)	8 221 000 (Se requiere realizar cada 8 años)
COSTO ANUAL UNIFORME EQUIVALENTE	6 937 397	6 822 412

Tabla 7.2. Costos Anuales Equivalentes.

En la INVERSIÓN se considero lo siguiente:

	CBA
EQUIPO	COSTO USD
2 Reactores (4.27 X 15.24m)	4 353 840
1 Condensador (3.22E6 kcal/hr)	3 991 020
Válvulas (10)	1 500 000
Tubería	10 835 880
Catalizador	140 000
Controladores (2)	2 285 766
Mano de obra	
Operarios	65 308
Administrativos	54 423
Ingenieros	3 012 857
Arquitectos	3 660 854
Ejecutivos	2 039 097
Contratistas	4 328 443
Servicios Auxiliares	14 512
	36 282 000

	SUPERCLAUS
EQUIPO	COSTO USD
1 Reactores (4.27 X 15.24m)	2 158 320
1 Condensador (3.22E6 kcal/hr)	3 956 920
1 Recalentador (1.56E6 kcal/hr)	3 597 200
1 Recalentador (5.0E4 kcal/hr)	2 446 096
Válvulas (2)	300 000
Tubería	6 534 680
Catalizador	1 275 000
Controladores (2)	3 777 060
Mano de obra	
Operarios	65 308
Administrativos	47 167
Ingenieros	2 426 636
Arquitectos	3 319 174
Ejecutivos	1 835 187
Contratistas	4 221 972
Servicios Auxiliares	11 280
	35 972 000

En el MANTENIMIENTO se considero lo siguiente:

	CBA
MANO DE OBRA	COSTO X DIA USD
Mantenimiento	167.02
Obreros	74.02
Administrativos	161.00
Ingenieros	5 272.50
Arquitectos	6 643.77
Ejecutivos	3 681.70
	192 000

	SUPERCLAUS
MANO DE OBRA	COSTO X DIA USD
Gerentes	111.00
Jefes	55.55
Supervisores	46.20
Ingenieros E	46.20
Laboratoristas	24.10
Instrumentistas	69.40
Mantenimiento	233.80
Obreros	95.20
Admimistrativos	161.00
Ingenieros A	4 940.40
Arquitectos	5 286.10
Ejecutivos	2 931.20
	42 000

En los COSTOS OPERATIVOS se considero lo siguiente:

	CBA
MANO DE OBRA	COSTO X MES USD
Instrumentos	693.62
Ingeniero	693.62
Laboratorio	693.62
Mantenimiento	3 006.28
Obreros	1 268.83
Administrativos	604.70
Servicios auxiliares	2 418.80
	900 429

	SUPERCLAUS
MANO DE OBRA	COSTO X DIA USD
Ingeniero	693.62
Laboratorio	693.62
Instrumentos	693.62
Mantenimiento	1 002.09
Obreros	634.42
Administrativos	604.70
Servicios auxiliares	1 880.08
	595 406

La perdida por producción, es ocasionada por el mantenimiento de la planta (cambio de catalizador y váluvas principalmente). Se considera pérdida en la producción de las plantas Endulzadoras, Criogénicas y Fraccionadora; para el proceso SUPERCLAUS es cada 8 años, y para el CBA cada 2 años.

Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE)

$$\text{CAUE} = \text{Costo anual por Operación} + \text{Costo anual por Mantenimiento} + \text{Inversión Inicial} * \left(\frac{A}{P}, i, n\right) - \text{VS} * \left(\frac{A}{F}, i, n\right) + \text{Pérdida de Producción}$$

$$\text{Pago uniforme dado un Presente} = P\left(\frac{A}{P}, i, n\right) = P\left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}\right]$$

$$\text{Pago uniforme dado un Futuro} = F\left(\frac{A}{F}, i, n\right) = F\left[\frac{i}{(1+i)^n - 1}\right]$$

n = Tiempo.
VS (Valor de Salvamento) = Dinero que se recibe por un equipo al final de su vida útil.
i = Tasa de interés (10%).

Sustituyendo.

$$\text{CAUE}_{\text{Superclaus}} = 74\,375 + 5\,250 + 35\,972\,000 * \left[\frac{0.1*(1+0.1)^8}{(1+0.1)^8 - 1}\right] + 1\,027\,625 = 7\,850\,037$$

$$\text{CAUE}_{\text{CBA}} = 112\,553.62 + 24\,000 + 36\,282\,000 * \left[\frac{0.1*(1+0.1)^8}{(1+0.1)^8 - 1}\right] + 4\,110\,500 = 11\,047\,897$$

Como se pudo observar en el capítulo cuatro, donde se realizo la selección del tratamiento de gas de cola. El proceso CBA necesita mayores requerimientos (como equipo, catalizar, controladores, mano de obra,,,) en comparación con el proceso SUPERCLAUS, además en costos se puede observar que el proceso CBA requiere una mayor inversión, mantenimiento, costos operativos que el SUPERCLAUS.

Los costos adicionales significativos causados por la operación de un sistema CBA son:

En cuanto a las válvulas : El gran número de válvulas programables que tienen como función dirigir el flujo de gas hacia uno u otro reactor CBA, representa el mayor porcentaje del costo adicional. Las partes que normalmente se gastan durante la operación normal son los sellos, empaques, asientos, el disco, y con mayor frecuencia el vástago, el cuerpo, las bridas y otros

internos. (Las recomendaciones de la mayoría de los usuarios coinciden en una adecuada selección del tipo de válvulas para evitar al máximo las posible fallas de las mismas). De igual manera, se sugiere un especial cuidado en la selección del control y programador, ya que un gran porcentaje de las fallas en las válvulas se debe a fallas del sistema de control.

En cuanto a las materiales : El posible daño causado por corrosión y fatiga de los materiales es debido al carácter cíclico del proceso, provocando deformaciones en los materiales de construcción del equipo. Como resultado de conjuntar las variaciones en la temperatura y el gran número de uniones entre el equipo y la tubería, por el número de válvulas, se tiene una gran cantidad de posibles puntos de fuga a la atmósfera de gases ácidos que son tóxicos, con los consecuentes riesgos para el personal de operación o vecinos del centro de trabajo, lo que conduce a un paro en la planta. Sin embargo, el costo que significa la reposición de materiales, pudiera ser disminuido si desde el diseño de la planta se considera el uso de acero inoxidable y recubrimientos sobre el acero al carbón, además de instalar juntas de expansión y soportería adecuada en tubería.

En cuanto a la instrumentación : El sistema de control ABC requiere de un controlador programable que ordene el cierre y la apertura de las válvulas que dirigen el flujo de gas de proceso y de regeneración a cada uno de los reactores correspondientes. Este sistema de control, según reportan algunos usuarios, es causa frecuente de falla de las válvulas, llegando a ocasionar en condiciones extremas, el paro de la unidad ABC y si no se tiene considerado desviar el flujo de gas de esta unidad al quemador elevado o incinerador, puede ocasionar el paro de la planta de azufre y en consecuencia el de la planta endulzadora de gas (esto debido a restricciones ambientales).

Respecto a los costos, en cuanto a inversión son 310 000 dólares más; en mantenimiento son 150 000 dólares más al utilizar CBA. Por lo cual los costos anuales uniformes equivalentes del CBA son mayores en 3 197 861 USD comparados con el SUPERCLAUS.

Además al utilizar SUPERCLAUS se recuperan 24 millones de dólares al evitar parar la producción cada dos años en un periodo de 8 años.

Resumiendo lo anterior, se ve que la vulnerabilidad de la planta se encuentra básicamente en el paquete de válvulas y en su sistema de control, lo que es causa del mayor porcentaje de los costos adicionales. En orden de importancia, la segunda causa de costos adicionales es el mantenimiento para reposición de materiales adecuados, por la rigidez del proceso.

Por los cual conviene utilizar el Tratamiento de Gas de Cola SUPERCLAUS, en el CPG de Nuevo PEMEX, ya que con este proceso los costos anules son menores, para la mayor recuperación posible de azufre, y de esta manera lograr disminuir las emisiones de contaminantes de dióxido de azufre.

8. CONCLUSIONES

Cada vez se emite mayor número de contaminantes a la atmósfera, debido a la industrialización y a la inconsciencia que se tiene, lo cual genera un gran deterioro en el ambiente.
Sin embargo las normas y regulaciones ambientales adoptadas por los gobiernos local, estatal y federal en los últimos tres o cuatro años, impulsa a que las industrias lleven a cabo sistemas para disminuir sus emisiones contaminantes.

PEMEX incluye en su procesamiento de gas un tratamiento para disminuir la contaminación por SO_2, pero esto no es suficiente. Aunque en estos tiempos PEMEX tiene una gran deuda, debido a inversiones para mantener la industria de la petroquímica en marcha, poco a poco ha estado saliendo de esto, además se están consolidando lazos entre empresas privadas, para que inviertan en proyectos de PEMEX, y de esta manera lograr mayores ingresos para poder disminuir su deuda. Aunque PEMEX esta en números rojos, se tiene que ver la manera de poder invertir en procesos para disminuir sus niveles de contaminantes, ya que si bien este es un proceso no rentable. Se tiene que aplicar por regulaciones ambientales y más que esto por humanidad.
Por lo cual la importancia de este proyecto; y que no solo en el Complejo Procesador de Gas de Nuevo PEMEX, en Tabasco se aplique; sino extenderlo a todos los complejos procesadores de gas del territorio nacional y del extranjero.

Ya que en el proceso de endulzamiento de gas amargo y condensados amargos, en el C.P.G de Nuevo PEMEX. Tabasco, se genera gas ácido cuyos componentes principales son el ácido sulfhídrico y el dióxido de carbono, que de no contar con un sistema de control los compuestos de azufre, se emitirían directamente a la atmósfera y la emisión de estos agentes contaminantes deterioran y alteran el ambiente; por lo cual se tomó un control, mediante un proceso para disminuir las emisiones de dióxido de azufre a la atmósfera.
El proceso más utilizado a nivel mundial para el control de estas emisiones es basado en la recuperación (como azufre elemental) de los compuestos de azufre, en Plantas Recuperadoras de Azufre. Este proceso es el Tratamiento de Gas de Cola SUPERCLAUS.

Como se observó en los resultados de la prueba de desempeño, al utilizar solamente el proceso Claus se obtiene una recuperación del 95% de azufre, con lo cual se genera una emisión de SO_2 de 5827 ppm, con estos resultados se esta fuera de la NOM-137-SEMARNAT-2003. La cual establece que para concentraciones de gas ácido mayores al 20% de H_2S y recuperaciones mayores a 300 TON/D, se debe tener una recuperación del 97.5%. Lo cual solamente se logra utilizando el Tratamiento de Gas de Cola SUPERCLAUS, con el se obtiene una recuperación del 99% (mayor a la impuesta por la norma), y se genera una emisión de SO_2 de 1291 ppm; con esto logra una disminución del 77.83% de éste contaminante.

En ocasiones se obtienen recuperaciones mayores o menores, pero esto depende principalmente de la composición del gas ácido, por lo cual en este caso debido a las características del gas tratado se considera que se obtiene una buena recuperación.

Con otros tratamientos de gas de cola, probablemente se obtendría la misma recuperación, pero se tendría que hacer un mayor costo adicional, ya que comparando el proceso Superclaus con el CBA se tiene un beneficio de 310 000 USD en inversión y 114 985 USD en costos anuales. Y con otros procesos se tendría un mayor costo, ya que utilizan un mayor número de equipo, otros servicios auxiliares, y sus costos anuales son mayores.

Con lo que se puede decir que este proceso es de gran beneficio en las Unidades Recuperadoras de Azufre del Complejo Tabasco, ya que cada vez se emiten menores cantidades de azufre en forma de dióxido de azufre a la atmósfera, y con ello contribuye a la disminución de efectos nocivos al ambiente, así mismo para beneficio de las instalaciones.

El presente trabajo esta enfocado a disminuir las emisiones de dióxido de azufre, pero se sabe que el gas ácido contiene dióxido de carbono el cual también es un contaminante y a través del proceso se genera un poco más, esto aunado al nitrógeno (del aire y del vapor del agua). Por lo cual se debe poner atención también a estos contaminantes, tratando de aplicar un proceso similar para su disminución. Para que el esfuerzo de disminuir la contaminación por dióxido de azufre se extienda a sus demás contaminantes.
En cuanto al SO_2 se podría poner una trampa a la salida del gas de incineración para regresarlo a la parte del proceso donde es utilizado (y de esta manera reducir más sus emisiones), lo mismo se podría hacer con el CO_2, y tener cerca una planta donde se pueda ocupar o venderlo.

El análisis del proceso SUPERCLAUS ayuda a los Ingenieros Químicos ha conocer una herramienta más en la recuperación de azufre, ya que corresponde lograr nuevas formas de evitar la contaminación, evitando la generación de contaminantes, por medio de la creación de instalaciones para tratarlos, y obtener un ambiente más limpio y sano.

Este proyecto tiene sus principales aplicaciones en los lugares donde se genera dióxido de azufre, siendo en los Complejos Procesadores de Gas donde se obtiene. Pero también se puede aplicar en algún otro lugar donde se genere éste contaminante, y tenga las características adecuadas para aplicarlo.

9. BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

- Wark Kenneth, Warner Cecil. F, Contaminación del aire Origen y Control, Edit. Limusa Noriega Editores, Méx. D.F, 1997, 2da edic.
- Seoanez Calva Mariano, Ecología Industrial: Ingeniería Medioambiental aplicada a la industria y a la empresa, Edit. Ediciones Mundi-Presa, Madrid. España, 1995.
- De Neves Noel, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, Edit. Mc-Graw-Hill, 1998.
- De Lora Soria Federico, Técnicas de Defensa del Medio Ambiente, Edit. Labor.S.A. Barcelona, 1978.
- Harold. A. Wittcoff, Ph. D, Productos Químicos Orgánicos Industriales. Vol. 1. Edit. Noriega Limusa, 1999.
- Waddamn. A. Lawrence, Chemicals from Petroleum, Edit. Gulf Publishing. Company Houston Texas, 1980.
- James. H. Gary, Refino de Petróleo, Edit. Reverté.S.A. 1980.
- Maron Samuel. H, Prutton Carl. F, Fundamentos de Fisicoquímica, Edit. Limusa. Méx. D.F, 1984.
- Glasstone Samuel, Lewis David, Elementos de Química-Física, Edit. Medico-Quirúrgica, Buenos Aires. Argentina, 1980.
- Manrique. ph. José. A, Cárdenas. M. Rafael. S, Termodinámica, Edit. Harla Buenos Aires. 1976.
- Hougen. O. A, Watson. K. M, Ragatz. R. A, Principios de los Procesos Químicos. Parte II. Termodinámica, Edit. Reverte. Barcelona, 1982.
- Hahn Albert. H, The Petrochemical Industry, Edit. Mc-Graw-Hill. Book Company. U.S.A, 1970.
- Smith. J. M, Van Ness. H. C, Abott. M. M, Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química, Edit. McGraw-Hill. Méx. D.F, 1997, 5ta edic.
- Whitten. K. W, Gayley. K. D, Davis. R. E, Química general, Edit. Interamericana, Méx. D.F, 1985.
- Mortimer. C. E, Química, Edit. Iberoamericana, Méx. D.F, 1983, 5ta edic.
- Baca Urbina Gabriel, Fundamentos de Ingeniería Económica, Edit. Mc-Graw-Hill. Méx. D.F, 1994.

  - ✓ Enciclopedia de Tecnología Química, Kirck Othmer.
  - ✓ Enciclopedia Industrial Química Ullmann's. Vol. A25 Frankfurt/Main, Federal Republic of Germany.
  - ✓ PEMEX. Manuales de operación de la Planta Recuperadora de Azufre

- ✓ Revisión de las Tecnologías de Recuperación de Azufre. Price-Water-Coopers. 1998.
- ✓ Fundamentos de la Recuperación de Azufre por medio del Proceso Claus. Asociación Goar, Allison. Tyler, Texas.
- ✓ NOM-137-SEMARNAT-2003
- ✓ PROY-NOM-098-ECOL-2002

REVISTAS

- ✓ Gene Goar. B, "Today's Sulfur Recovery Processes", Hydrocarbon Processing, Vol. 47, No.9, September 1968, pp.248-252.
- ✓ Gene Goar. B, "Impure Feeds Cause Claus Plant Problems", Hydrocarbon Processing, Vol. 53, July 1974, pp.129-132.
- ✓ C. Bourdon John, "Improve Operations and Enhance Refinery Sulfur Recovery", Hydrocarbon Processing, Vol. 76, No.4, Abril 1997, pp.57-62.
- ✓ C. Hardison. L, "Go from H_2S to S in One Unit ", Hydrocarbon Processing, Vol. 64, No.9, Abril 1985, pp.70-71.
- ✓ C. Hardison. L, "H_2S to S: Process Improved", Hydrocarbon Processing, Vol. 71, No.1, Enero 1992, pp.89-90.
- ✓ P. Heisel Michael, J. Marold Freimut, "How New Tail Gas Treater Increases Claus Unit thruput", Hydrocarbon Processing, Vol. 71, No.3, Marzo 1992, pp.83-85.
- ✓ J. Pearson. M, "Special Catalyst Improve C-S Compounds Conversion", Hydrocarbon Processing, Vol. 60, No.4, Abril 1981, pp.131-134.
- ✓ M. Parsons Ralph, "Process Meets Sulfur Recovery Needs", Hydrocarbon Processing, Vol. 60, No.5, Mayo 1981, pp.104-107.
- ✓ M. Parsons Ralph, "Catalytically degas Claus Sulfur", Hydrocarbon Processing, Vol. 60, No.5, Mayo 1981, pp.102-103.
- ✓ W. Taggart George, "Be Careful of Feedforward for Claus Control", Hydrocarbon Processing, Vol. 60, No.3, Marzo 1981, pp.155-157.
- ✓ Larraz Mora Rafael, "Claus Catalyst Pore Structure Optimization", Hydrocarbon Processing, Vol. 78, No.7, Julio 1999, pp.69-72.
- ✓ H. Wines Thomas, "Improve liquid/gas Coalescer Performance", Hydrocarbon Processing, Vol. 79, No.1, Enero 2000, pp.89-96.
- ✓ J. Kelly. W, "Oversights and Mythology in a HAZOP Program", Hydrocarbon Processing, Vol. 70, No.10, Octubre 1991, pp.114-116.
- ✓ L. Post Robert, "HAZROP: An Approach to Combinig Hazop and RCM", Hydrocarbon Processing, Vol. 80, No.5, Mayo 2001, pp.69-76.
- ✓ K. Shiflett Woodrow, "Consider Improved Catalyst Technologies to Remove Sulfur", Hydrocarbon Processing, Vol. 81, No.2, Febrero 2002, pp.41-43.
- ✓ Fredrick Cyndie, "Sulfur Reduction: What are The Options?", Hydrocarbon Processing, Vol. 81, No.2, Febrero 2002, pp.45-50.
- ✓ E. Campbell Charles, "Incineration or Thermal oxidation", Chemical Engineering, Vol. 104, No.5, Mayo 1997, pp.142-145.
- ✓ Shelley Suzanne, "Controlling H_2S Emissions", Chemical Engineering, Vol. 104, No.3, Marzo 1997, pp.125-128.
- ✓ Blanco Jesus, Alvarez Esperanza, Knapp Carlos, "Control Dioxin Emissions from Combustion Processes", Chemical Engineering , Vol. 106, No.11, Octubre 1999, pp.149-152.

- ✓ Parkinson Gerald, "Refiners Crack Down on Sulfur", Chemical Engineering, Vol. 107, No.8, Agosto 2000, pp.45-48.
- ✓ Gamson. B. W, Elkins, R. H. "Sulfur from Hydrogen Sulfide", Chemical Engineering Progress, Vol. 49, No. 4, April 1953, pp.203-215.
- ✓ Valdes. A. R, "New Look at Sulfur Plants, Part1", Hydrocarbon Processing and Petroleum Refiner, Vol.43, No.3, Marzo 1964, pp.104-108.
- ✓ Valdes, A.R, "New Look at Sulfur Plants, Part2", Hydrocarbon Processing and Petroleum Refiner, Vol.43, No.4, Abril 1964, pp.122-124.
- ✓ Gene Goar. B, "Sulfur Recovery from Natural Gas Involves Big Investment", Oil and Gas Journal, Vol.73, No.7, Julio 1975, pp.78-85.
- ✓ Gene Goar. B, "Sulfur Recovery Technology", Energy Progress, Vol.6, No.6, Junio 1986, pp.71-75.
- ✓ M. Vatavuk. William, "Updating the CE Plant Cost Index", Chemical Engineering, Vol.109, No. 1, Junio 2002, pp. 62-70.
- ✓ A. Lagas. Jan, "Understanding the formation of and handling of H_2S and SO_2 emissions from liquid sulphur during storage and transportation", Sulphur Seminar 1999, Stork Engineers & Contractors, Amsterdam. The Netherlands.

INTERNET

http://www.imp.mx/petroleo
http://www.imp.mx/petroleo/apuntes/gas.htm
http://www.is.siemens.de/data/presse/docs/isfb06012371e.pdf
http://www.sc.ehu.es/iawfemat/archivos/materia
http://www.goarallison.com/SUPERCLAUS.htm
http://www.goarallison.com/COPE.htm
http://www.goarallison.com/DGAASS.htm
http://www.tnrcc.state.tx.us/permitting/airperm/nsr_permits/files/sru.pdf
http://www.fquim.unam.mx/html/portales/Seguridad/hojas/HOJA19.html
http://www.elcor.com/ortloff/sulfur/html/sulfmain.htm
http://www.elcor.com/ortloff/sulfur/html/choosesesulf.htm
http://www.elcor.com/ortloff/sulfur/html/claus.htm
http://www.elcor.com/ortloff/sulfur/html/claus-tailgas.htm
http://www.elcor.com/ortloff/sulfur/html/therm-oxidizer.htm
http://www.elcogas.es/content_es/VD_3D_9C/VD_3D_9C.htm
http://www.nelliott.demon.co.uk/company/claus.html
http://www.ortloff.com/sulfur/html/claus.htm
http://www.deltacnt.com/an-htp26.htm
http://www.lurgi-oel.de/english/nbsp/main/info/sulfur_recovery.pdf
http://www.petrogasusa.com/pgeng/Clauscat.html
http://www.gtp-merichem.com/tp_tailgas.html
http://nett21.unep.or.jp/JSIM_DATA/AIR/AIR_6/html/Doc_142.html

http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch08/final/c08s13.pdf
http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/vision21/v21p.05.pdf
http://www.cox-internet.com/arrington/companies/sulfur.htm
http://www.tnrcc.state.tx.us/permitting/airperm/nsr_permits/files/sru.pdf
http://www.sima.com.mx/valle_de_mexico/bioxido_de_azufre.asp
http://www.conama.cl/rm/568/propertyvalue-836.html
http://dgenp.unam.mx/chaac/paginas/lluvia.html

9.1 APENDICE I

Viernes 30 de mayo de 2003 DIARIO OFICIAL (Segunda Seccion) 1

SEGUNDA SECCION

SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

NORMA Oficial Mexicana NOM-137-SEMARNAT-2003, Contaminación atmosférica.- Plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos.- Control de emisiones de compuestos de azufre.

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-137-SEMARNAT-2003, CONTAMINACION ATMOSFERICA.- PLANTAS DESULFURADORAS DE GAS Y CONDENSADOS AMARGOS.- CONTROL DE EMISIONES DE COMPUESTOS DE AZUFRE.

CASSIO LUISELLI FERNANDEZ, Subsecretario de Fomento y Normatividad Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, y Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, con fundamento en los artículos 32 bis fracciones I, II, III, IV y V de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 1o., 4o. y 8o. fracción V del Reglamento Interior de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; 5o. fracciones I, II, V y XII, 6o., 15, 36 fracciones I, II y IV, 37, 37 bis, 110 fracciones I y II, 111 fracción III, 111 bis segundo párrafo, 113, 160 y 171 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 1o., 3o. fracciones I y VII y 13, 16 y 17 del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera; 38 fracción II, 40 fracciones X y XIII, 47 fracción IV y 51 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 34 y 40 del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, y

CONSIDERANDO

Que para la protección del aire ambiente es necesario controlar la emisión de contaminantes a la atmósfera, con la finalidad de asegurar la calidad del aire en beneficio de la salud y bienestar de la población y de preservar el equilibrio ecológico en las regiones donde se ubican instalaciones industriales;

Que dado que en el proceso de desulfuración de gas amargo y condensados amargos se genera gas ácido, cuyos componentes principales son bióxido de carbono y ácido sulfhídrico, siendo éste un gas de muy elevada toxicidad, es necesario evitar su liberación a la atmósfera.

Que existen diversos sistemas para el control de estas emisiones, de los cuales el más utilizado es el que se basa en la recuperación de los compuestos de azufre, como azufre elemental en plantas recuperadoras de azufre, las cuales emiten a la atmósfera sólo una fracción de azufre remanente, en forma de bióxido de azufre y trazas de ácido sulfhídrico.

Que la emisión masiva de estos agentes contaminantes a la atmósfera deterioraría la calidad del aire, lo que hace necesario cumplir con una eficiencia mínima de recuperación de azufre, de tal manera que se asegure la calidad del aire, la conservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.

Que con la aplicación de esta Norma, se logrará reducir las emisiones de dióxido de azufre, considerando las características del proceso productivo.

Que reconociendo que la NOM-085-ECOL-1994, exceptúa a las plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos de su campo de aplicación, es necesaria esta Norma para dichas plantas.

Que en cumplimiento a lo dispuesto por el artículo 47 fracción I de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización con fecha 26 de noviembre de 2002 se publicó en el **Diario Oficial de la Federación**, con carácter de proyecto la presente Norma Oficial Mexicana bajo la denominación Norma Oficial Mexicana NOM-137-ECOL-2002, Contaminación atmosférica.- Plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos.-

Control de emisiones de compuestos se azufre, con el fin de que los interesados en un plazo de 60 días naturales posteriores a la fecha de su publicación presentaran sus comentarios al Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, sito en bulevar Adolfo Ruiz Cortines número 4209, 5o. piso, colonia Jardines en la Montaña, código postal 14210, Delegación Tlalpan, en México, Distrito Federal o al correo electrónico cgarciamoreno@semarnat.gob.mx;

Que de acuerdo a lo establecido en el artículo 47 fracciones II y III de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, los interesados presentaron sus comentarios al Proyecto de Norma en cuestión, los cuales fueron analizados por el actual Comité realizándose las modificaciones procedentes al proyecto; las respuestas a los comentarios y modificaciones efectuadas fueron publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** el 17 de abril de 2003, en términos de la ley de la materia;

Que habiéndose cumplido el procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización para la elaboración de normas oficiales mexicanas, el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales en sesión de fecha 31 de enero de 2003, aprobó la presente Norma Oficial Mexicana bajo la siguiente denominación: NOM-137-SEMARNAT-2003, Contaminación atmosférica.- Plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos.- Control de emisiones de compuestos de azufre.

Por lo expuesto y fundado, expido la siguiente:

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-137-SEMARNAT-2003.- CONTAMINACION ATMOSFERICA.- PLANTAS DESULFURADORAS DE GAS Y CONDENSADOS AMARGOS.- CONTROL DE EMISIONES DE COMPUESTOS DE AZUFRE

CONTENIDO

1. Objetivo

2. Campo de aplicación

3. Referencias

4. Definiciones

5. Especificaciones

6. Requisitos

7. Métodos de prueba

8. Evaluación de la conformidad

9. Grado de concordancia con normas y lineamientos internacionales y con las normas tomadas como base para su elaboración

10. Bibliografía

11. Observancia de esta Norma

1. Objetivo

Esta Norma Oficial Mexicana tiene por objeto establecer las especificaciones y los requisitos del control de emisiones de las plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos, así como los métodos de prueba para verificar el cumplimiento de la misma.

2. Campo de aplicación

La presente Norma es de observancia obligatoria para todos los responsables de plantas desulfuradoras de gas amargo y condensados amargos en todo el territorio nacional, con excepción de aquellas cuya capacidad nominal sea menor a 2 toneladas al día, de las ubicadas en plataformas marítimas, así como de las plantas utilizadas en las refinerías de petróleo.

3. Referencias

NMX-AA-009-SCFI-1993	Contaminación atmosférica.- Fuentes Fijas.- Determinación de flujo de gases en un conducto por medio de tubo Pitot. Publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 13 de diciembre de 1993.
NMX-AA-023-1986	Protección al ambiente.- Contaminación atmosférica.- Terminología. Publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 15 de julio de 1986.
NMX-AA-054-1978	Determinación del contenido de humedad en los gases que fluyen por un conducto.- Método gravimétrico. Publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 2 de agosto de 1978.
NMX-AA-055-1979	Determinación de bióxido de azufre en gases que fluyen por un conducto. Publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 4 de septiembre de 1979.
NOM-085-ECOL-1994	Contaminación atmosférica.- Fuentes Fijas.- Para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 2 de diciembre de 1994.

4. Definiciones

4.1 Azufre convertido o recuperado: Es la cantidad de azufre elemental en estado líquido que se obtiene en las plantas de recuperación de azufre cada 24 horas; esta cantidad de azufre es equivalente a la que dejará de ser emitida a la atmósfera.

4.2 Calibración: Procedimiento de ajuste de la lectura del analizador del equipo para el monitoreo continuo de emisiones a la atmósfera, para llevarlo al valor cero y para que coincida con el valor del gas de calibración.

4.3 Capacidad nominal de la planta recuperadora de azufre o del sistema de control de emisiones: Capacidad instalada expresada en toneladas por día de azufre recuperado; se selecciona para su diseño en función de la carga de azufre que deberá ser tratada en ella.

4.4 Carga de azufre a la planta recuperadora (S_T): Cantidad de azufre en toneladas por día que se extrae al gas amargo o a los condensados amargos y se alimenta al sistema de control de emisiones y, en su caso, a la planta recuperadora de azufre. Se calcula a partir de la concentración de ácido sulfhídrico en el gas ácido que se envía a cada planta recuperadora de azufre y del volumen del mismo.

4.5 Condensados amargos: Hidrocarburos asociados al gas amargo que se condensan por efecto de la variación de la presión y temperatura del fluido; contienen ácido sulfhídrico (H_2S) y bióxido de carbono (CO_2).

4.6 Chimenea del oxidador térmico de gases de cola: Conducto por el que se emite a la atmósfera el remanente de compuestos de azufre de las plantas recuperadoras de azufre en forma de bióxido de azufre y trazas de ácido sulfhídrico.

4.7 Emisión másica de bióxido de azufre (E (SO_2)): Cantidad de bióxido de azufre que se emite por la chimenea del oxidador térmico de las plantas recuperadoras de azufre o del sistema de control de emisiones utilizado. Se determina mediante un equipo de monitoreo continuo de emisiones a la atmósfera y se expresa en ton/día.

4.8 Equipo para el monitoreo continuo de emisiones a la atmósfera (EMCE): El equipo completo requerido para la toma de muestra en la chimenea del sistema de oxidación térmica o equivalente, su acondicionamiento, análisis y conexión a sistemas de adquisición de datos que proporcionen un registro permanente de las emisiones a la atmósfera de bióxido de azufre en unidades de masa por unidad de tiempo.

4.9 Gas ácido: Mezcla de ácido sulfhídrico (H_2S) y bióxido de carbono (CO_2) extraídos al gas amargo y condensados amargos en las plantas desulfuradoras.

4.10 Gas amargo: Mezcla gaseosa de hidrocarburos proveniente de los yacimientos de petróleo y gas, que contiene ácido sulfhídrico (H_2S) y bióxido de carbono (CO_2) como impurezas.

4.11 Gas de calibración: Gas de concentración conocida y trazable, con un grado de pureza certificado, utilizado como patrón primario en la calibración de instrumentos de medición.

4.12 Gas de cola: Mezcla de gases que contiene el remanente de compuestos de azufre en forma de ácido sulfhídrico (H_2S), dióxido de azufre (SO_2), disulfuro de carbonilo (COS), disulfuro de carbono (CS_2) y vapores de azufre que no fue posible retener en el sistema de control de emisiones o en las plantas recuperadoras de azufre y que debe someterse a un proceso de oxidación térmica o equivalente para reducir su toxicidad.

4.13 Oxidador térmico de gases de cola: Equipo de combustión a fuego directo cuya función es la oxidación del ácido sulfhídrico contenido en los gases de cola a bióxido de azufre.

4.14 Planta desulfuradora de gas amargo y condensados amargos; Endulzadora de gas y condensados amargos: Instalación para el tratamiento de gas y condensados amargos en la que se les extraen las impurezas de ácido sulfhídrico y bióxido de carbono.

4.15 Plantas existentes: Plantas desulfuradoras de gas amargo y condensados amargos y plantas recuperadoras de azufre que ya se encuentran instaladas o en construcción en la fecha de publicación de la presente Norma.

4.16 Planta recuperadora de azufre: Es una instalación para extraer el azufre del gas ácido en forma de azufre líquido, basada en procesos de conversión térmica y/o catalítica, que se utiliza comúnmente para el control de emisiones de los procesos de desulfuración de hidrocarburos.

4.17 Plantas modificadas: Plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos y plantas recuperadoras de azufre rediseñadas para incrementar la eficiencia de recuperación, cuya modificación inicie en fecha posterior a la publicación de la presente Norma.

4.18 Plantas nuevas: Plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos y plantas recuperadoras de azufre cuya construcción inicie en fecha posterior a la publicación de la presente Norma.

4.19 Resto del país: Es toda la extensión territorial nacional excluyendo las zonas críticas.

4.20 Sistema de control de emisiones a la atmósfera asociado al proceso de desulfuración de gas amargo y condensados amargos; sistema de control de emisiones: Etapa del tratamiento del gas amargo, cuyo objetivo es reducir las emisiones de compuestos de azufre a la atmósfera; típicamente consta de una planta recuperadora de azufre, un oxidador térmico del gas de cola y un Equipo para el Monitoreo Continuo de Emisiones a la atmósfera (EMCE).

4.21 Zonas críticas: Se consideran zonas críticas (ZC), al igual que en la NOM-085-ECOL-1994, las zonas metropolitanas de las ciudades de México, Guadalajara y Monterrey; los centros de población de: Coatzacoalcos-Minatitlán (municipios de Coatzacoalcos, Minatitlán, Ixhuatlán del Sureste, Cosoleacaque y Nanchital) en el Estado de Veracruz; Irapuato-Celaya-Salamanca (municipios de Celaya, Irapuato, Salamanca y Villagrán) en el Estado de Guanajuato; Tula-Vito-Apasco (municipios de Tula de Allende, Tepeji de Ocampo, Tlahuelilpan,

Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tlaxoapan y Apaxco) en los estados de Hidalgo y de México; corredor industrial de Tampico-Madero-Altamira (municipios de Tampico, Altamira y Cd. Madero) en el Estado de Tamaulipas; el Municipio de Tijuana en el Estado de Baja California y el Municipio de Cd. Juárez en el Estado de Chihuahua.

5. Especificaciones

5.1 Las plantas desulfuradoras de gas amargo y condensados amargos existentes, nuevas y modificadas deben controlar sus emisiones de compuestos de azufre a la atmósfera y medirlas en forma continua.

5.2 La eficiencia mínima de control de emisiones a la atmósfera de compuestos de azufre de las plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos en condiciones normales de operación es la que se establece en la tabla 1, a excepción de lo indicado en el 5.3 de esta Norma.

Dicha eficiencia se expresa en por ciento de recuperación de azufre y es función de la capacidad nominal del sistema de control de emisiones (X) y de la concentración promedio de H_2S en el gas ácido de entrada al sistema o a las plantas recuperadoras (Y), la cual se determina según el método establecido en el numeral 7.2 de esta Norma.

TABLA 1.- EFICIENCIA MINIMA DE CONTROL DE EMISIONES (O DE RECUPERACION DE AZUFRE)

Concentración (% de H_2S en el gas ácido), Y	Capacidad Nominal del Sistema o de la Planta Recuperadora de azufre (toneladas de azufre recuperado por día), X		
	2 a 5 ton/día	5 a 300 ton/día	>300 ton/día
> 20	$E_m = 74\%$	$E_m = 85.35\ X^{0.0144}\ Y^{0.0128}$	$E_m = 97.5\%$
10-20	$E_m = 74\%$	$E_m = 90.8\%$	$E_m = 90.8\%$
< 10	$E_m = 74\%$	$E_m = 74\%$	$E_m = 74\%$

5.3 Cualquier planta desulfuradora de gas y condensados amargos nueva que se instale en una zona crítica deberá contar con un sistema de control de emisiones (o de recuperación de azufre) cuya eficiencia mínima sea mayor o igual al 98%, cualquiera que sea su capacidad.

6. Requisitos

6.1 El diseño de los sistemas de control de emisiones de las plantas desulfuradoras de gas ácido y condensados amargos deberá ser tal, que la concentración de ácido sulfhídrico en los gases de salida de la chimenea sea menor o igual a 10 ppm, en volumen.

6.2 Los responsables de la operación de las plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos deben llevar una bitácora de operación y mantenimiento, de cada una de estas plantas, la cual debe permanecer en el centro de trabajo por un periodo mínimo de cinco años y puede ser almacenada y desplegada en forma electrónica y como parte de los controles computarizados con que cuente cada planta. En la bitácora debe registrarse como mínimo la siguiente información:

6.2.1 Control de operación: Fecha, consumo diario de combustible en el oxidador térmico, promedio diario de la temperatura de operación del oxidador térmico, determinación cada 24 horas del volumen en base húmeda de gas ácido alimentado (millones de pies cúbicos por día MMPCD) a condiciones de 1.0 kgf/cm^2 y 20°C, resultados de la concentración diaria en % mol de H_2S base seca, concentración diaria de compuestos de azufre en el gas de cola, y memoria de cálculo de eficiencia y promedios trimestrales.

6.2.2 Control de emisiones contaminantes: Promedio diario de los siguientes parámetros: concentración de bióxido de azufre y flujo volumétrico de los gases de salida del oxidador térmico, emisión másica en toneladas por día de bióxido de azufre (E (SO_2)) y memoria de cálculo de promedios trimestrales.

6.2.3 Control de Mantenimiento: Intervenciones a los equipos críticos: soplador, reactor térmico, condensadores, oxidador térmico y sistemas de control, cambios de catalizador.

6.3. Para cumplir con el requisito establecido en el numeral 6.2.2 de esta Norma, los responsables deben instalar y mantener en buenas condiciones de operación, equipos de monitoreo continuo de las emisiones de bióxido de azufre.

6.3.1 Estos equipos deben operar cuando menos el 90% del tiempo de operación del sistema de control de emisiones utilizado y deben contar con un sistema de procesamiento de datos automático que registre un mínimo de 12 lecturas por hora, calcule el promedio diario de los parámetros indicados y genere un reporte impreso diario con la fecha y la identificación del equipo, que se anexará a la bitácora.

6.3.2. El método de medición de la concentración de bióxido de azufre en la emisión a la atmósfera por la chimenea del oxidador térmico debe ser el de espectroscopia de absorción en el ultravioleta no dispersivo o un método equivalente y el del flujo volumétrico de gases debe ser el de presión diferencial en un tubo Pitot, sugiriendo llevar a cabo el procedimiento establecido en la NMX-AA-009-SCFI-1993 y siguiendo los procedimientos y cálculos especificados por el fabricante.

6.3.3 Los responsables de la operación de estas plantas deberán instalar y mantener en buenas condiciones Plataformas y Puertos de Muestreo de acuerdo a lo señalado en la Norma Mexicana NMX-AA-009-SCFI-1993, en cada una de las chimeneas de los oxidadores térmicos para la colocación permanente del Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones de SO_2.

Para verificar el funcionamiento del equipo en la chimenea de cada oxidador térmico, deben instalarse por lo menos 2 puertos de muestreo adicionales, colocados 30 centímetros debajo de los requeridos en la NMX-AA-009-SCFI-1993 y formando un ángulo de 45°, a los cuales se tendrá acceso desde la plataforma de muestreo.

7. Métodos de prueba

7.1 La eficiencia del sistema de control de emisiones de bióxido de azufre (E) o la eficiencia de cada planta recuperadora se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$E = 100\% \ (S_T - S_{GC}) / S_T$$

En donde:

E es la eficiencia del control de emisiones de bióxido de azufre (E); para el caso de utilizar un sistema de recuperación de azufre, ésta es equivalente a la eficiencia de cada planta recuperadora;

S_T es la carga de azufre total en el gas ácido que se alimenta al sistema de control de emisiones o, en su caso a cada planta recuperadora; se determina según la metodología del 7.2, en toneladas por día;

S_{GC} es la cantidad de azufre en el gas de cola, en forma de H_2S, SO_2, COS, CS_2 y vapores de azufre; se determina de acuerdo a lo establecido en el 7.3 y se expresa en toneladas por día.

7.2 Determinación de la carga de azufre S_T: La carga total de azufre en el gas ácido S_T que se alimenta al sistema de control de emisiones o, en su caso, a cada planta recuperadora en toneladas por día se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$S_T(\text{ton/día}) = \frac{36.51 \cdot (\text{Fga}) \cdot (\%\text{mol}H_2S\text{bh})}{100}$$

En donde:

Fga es el flujo de alimentación de gas ácido en base húmeda (Fga) en millones de pies cúbicos (MMPCD) por día. Se determina con un medidor de gas ácido de carga colocado en la línea principal de alimentación a cada uno de los sistemas de control de emisiones (plantas recuperadoras de azufre) la medición deberá ser compensada por presión, temperatura y por el peso molecular a condiciones de 1.0 kgf/cm^2 y 20°C. Como elemento primario de medición se puede utilizar un tubo Vénturi, placas de orificio o un sistema equivalente.

% mol de H_2S bh es la concentración promedio de 24 horas de ácido sulfhídrico (%H_2S) en el gas ácido a la entrada del sistema de control de emisiones; se determina mediante análisis de cromatografía de gases con columna empacada y detector de conductividad térmica en base seca, efectuando las correcciones por el contenido de agua.

7.3 Determinación de la cantidad de azufre en el gas de cola S_{GC}: La cantidad de azufre en el gas de cola se obtiene como resultado de la suma de la cantidad de azufre en forma de compuestos de azufre, Sc, y la cantidad de azufre contenido en forma de vapores, Sv:

$$S_{GC}(\text{ton/día}) = S_C(\text{ton/día}) + S_V(\text{ton/día})$$

7.3.1 Determinación de S_C: La cantidad de azufre en toneladas por día contenida en el gas de cola en forma de H_2S, SO_2, COS, CS_2, se determina por la ecuación:

$$Sc(\text{ton/dia}) = 0.032064 \cdot \left(\frac{N_2\text{aire}(\text{Kg} - \text{mol/dia})}{\%\text{mol}N_2} \right) \cdot (\%\text{mol}H_2S + \%\text{mol}SO_2 + \%\text{mol}COS + 2(\%\text{mol}CS_2))$$

En donde:

%mol H_2S, SO_2, COS, CS_2, N_2 es la composición del gas de cola; se determina mediante análisis cromatográfico en base seca y se calcula su composición en base húmeda;

N_2 aire(Kg-mol/dia) es el flujo molar de nitrógeno que entra a la planta recuperadora; es igual al flujo molar de nitrógeno en el gas de cola, se determina conforme a la ecuación siguiente:

$$N_2\text{aire}(\text{Kg mol/día}) = \text{Faire}(\text{MMPCD}) \cdot \%\text{mol}N_2(\text{bh})_{\text{aire}} \cdot 11.3877$$

En donde:

% mol N_2 (bh) $_{aire}$ es el contenido de nitrógeno del aire en base húmeda;

F aire (MMPCD) es el flujo total de aire en millones de pies cúbicos por día (MMPCD) que entra a la planta recuperadora.

7.3.2 Determinación de S_V: la cantidad de vapor de azufre en el gas de cola se determina con las ecuaciones siguientes:

$$Sv(ton/día) = \%molSv \cdot 7.65\left(\frac{N2aire(Kgmol/día)}{\%molN2(bh)}\right)\cdot 0.032064$$

$$\%molSv = antilog\left(6.0849 - \frac{4087.8}{T+273}\right)\cdot\frac{100}{Pabs}$$

En donde:

T es la temperatura de salida del gas de cola en °C;

P abs es la presión de vapor del azufre; en Kg/cm^2

%mol N_2 (bh) es el contenido de nitrógeno en % mol del gas de cola determinada mediante análisis cromatográfico en base seca y efectuando las correcciones para su determinación en base húmeda.

Esta fórmula es válida para temperaturas del vapor de azufre comprendidas entre 100 y 200°C.

7.4 La eficiencia E así calculada diariamente se compara con la eficiencia mínima requerida señalada en la tabla 1, E_m. Los promedios trimestrales de ambos valores (E^T, E_m) deben cumplir la siguiente ecuación:

$$E^T \geq E_m$$

Para la obtención de los promedios trimestrales anteriores, no se consideran los valores de las lecturas obtenidas durante las siguientes condiciones:

a. Operaciones de paro, liberación y enfriamiento de la planta recuperadora para mantenimiento preventivo y correctivo, siempre que no excedan de 96 horas.

b. Operaciones de estabilización durante el arranque de la planta, siempre que no excedan de 48 horas.

c. Contingencias que impliquen la salida de operación del sistema de reducción de emisiones o partes del mismo, siempre que no excedan de 24 horas.

7.5 Con fines de comprobación, se compara el valor de la emisión másica de bióxido de azufre medido en la chimenea del oxidador térmico de cada planta recuperadora de azufre mediante el equipo de monitoreo continuo de emisiones ($E(SO_2)$, ton/día), con el valor obtenido de S_{GC}, la cantidad de azufre en el gas de cola y se debe cumplir la relación siguiente:

$$E(SO_2) = (2\pm 0.4)\ S_{GC}$$

7.6 Los responsables deben informar en la tabla 2.3.1 de la Cédula de Operación Anual lo siguiente:

7.6.1 La emisión total anual de bióxido de azufre.

7.6.2 La eficiencia promedio anual del sistema de control de cada instalación utilizando los promedios trimestrales. Asimismo, deben anexar a la Cédula de Operación Anual copia de la memoria de cálculo de dichos promedios.

8. Evaluación de la conformidad

La evaluación de la conformidad será realizada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente o los organismos de verificación acreditados y aprobados en términos de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

A partir del año 2005, la Secretaría únicamente reconocerá los informes basados en resultados expedidos por laboratorios acreditados y aprobados de conformidad con las disposiciones de la ley en la materia.

9. Grado de concordancia con normas y lineamientos internacionales y con las normas mexicanas tomadas como base para su elaboración

Esta Norma no coincide con ninguna norma o lineamiento internacional, por no existir al momento de la emisión de la misma; tampoco existen normas mexicanas que hayan servido de base para su elaboración.

10. Bibliografía

10.0 Industrial and Engineering Chemistry Vol. 42, No. 4, April 1950, páginas 713 a 718.

10.1 Aviso por el que se da a conocer al público en general el Instructivo para obtener la Licencia Ambiental Unica y el Formato de Solicitud de Licencia Ambiental Unica para Establecimientos Industriales de Jurisdicción Federal y el Formato de Cédula de Operación Anual. **Diario Oficial de la Federación**, 18 de enero de 1999.

10.2 Code of Federal Regulation.- Title 40 CFR Part 60 Subpart LLL Standards of Performance for Onshore Natural Gas Processing: SO_2 Emissions (Código de Regulación Federal.- Título 40 CFR Parte 60 Subparte LLL Estándares de Desempeño para el procesamiento de gas natural en tierra.- Emisiones de SO2, Regulación de Estados Unidos de Norteamérica).

10.3 Code of Federal Regulations, Title 40 CFR Part 60 Appendix A Method 1 Sample and Velocity Traverses for Stationary Sources. (Código de Regulación Federal.- Título 40 CFR Parte 60 Apéndice A Muestreo y pruebas de Velocidad en Fuentes Estacionarias.- Regulación de Estados Unidos de Norteamérica).

10.4 Code of Federal Regulations, Title 40 CFR Part 60 Appendix A Method 6c Determination of Sulfur Dioxide from Stationary Sources (Instrumental Analizer Procedure). (Código de Regulación Federal.- Título 40 CFR Parte 60 Apéndice A Método 6c Determinación de Bióxido de Azufre de Fuentes Estacionarias, procedimiento de análisis instrumental.- Regulación de Estados Unidos de Norteamérica).

10.5 Code of Federal Regulations, Title 40 CFR Part 60 Appendix B Performance Specification 2.- Specifications and test procedures for SO_2 and NOx continuous Emission Monitoring Systems in stationary sources. (Código de Regulación Federal.- Título 40 CFR Parte 60, Apéndice B, Especificaciones de desempeño 2. Especificaciones y métodos de prueba de SO2 y NOX del Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones en Fuentes Estacionarias.- Regulación de Estados Unidos de Norteamérica).

10.6 Code of Federal Regulations, Title 40 CFR Part 60 Appendix B Performance Specification 6.- Specifications and test procedures for continuous emission rate Monitoring Systems in stationary sources.

(Código de Regulación Federal.- Título 40 CFR Parte 60 Apéndice B, Especificaciones de Desempeño 6.- Especificaciones y métodos de prueba para la tasa de emisión continua del Sistema de Monitoreo en Fuentes estacionarias.- Regulación de Estados Unidos de Norteamérica).

10.7 Code of Federal Regulations, Title 40 CFR Part 60 Appendix F.- Quality Assurance Procedures. Procedure 1 Quality Assurance Requirements for Gas Continuous Emission Monitoring Systems used for Compliance Determination. (Código de Regulación Federal.- Título 40 CFR Parte 60 Apéndice F, Procedimientos de calidad para los Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones de Gas usadas para la determinación del Cumplimiento.- Regulación de Estados Unidos de Norteamérica).

11. Observancia de esta Norma

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente vigilará el cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana.

El incumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana será sancionado conforme a lo establecido en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y los demás ordenamientos jurídicos aplicables.

TRANSITORIOS

PRIMERO.- La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor a los 60 días naturales posteriores a su publicación en el **Diario Oficial de la Federación**.

SEGUNDO.- Las plantas desulfuradoras de gas amargo y condensados amargos existentes y nuevas con capacidad nominal de 2 a 100 toneladas por día, contarán con un plazo de tres años, contados a partir de la entrada en vigor de esta Norma, para cumplir con las especificaciones de la misma.

TERCERO.- Provéase la publicación de esta de Norma Oficial Mexicana en el **Diario Oficial de la Federación**.

México, Distrito Federal, a los treinta días del mes de abril de dos mil tres.- El Subsecretario de Fomento y Normatividad Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, y Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, **Cassio Luiselli Fernández**.- Rúbrica.

REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE EN MATERIA DE PREVENCION Y CONTROL DE LA CONTAMINACION DE LA ATMOSFERA

(Publicado en el D.O.F. de fecha 25 de noviembre de 1988)

CAPITULO I

DISPOSICIONES GENERALES

ARTICULO 1o.- El presente Reglamento rige en todo el territorio nacional y las zonas donde la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, y tiene por objeto reglamentar la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en lo que se refiere a la prevención y control de la contaminación de la atmósfera.

ARTICULO 2o.- Las atribuciones que en esta materia tiene el Estado y que son objeto de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, serán ejercidas de manera concurrente por la Federación, las entidades federativas y los municipios.

ARTICULO 3o.- Son asuntos de competencia federal, por tener alcance general en la nación o ser de interés de la Federación, en materia de prevención y control de la contaminación de la atmósfera, los que señala el artículo 5o. de la Ley y en especial los siguientes:

I.- La formulación de los criterios ecológicos generales;

II.- Los que por su naturaleza y complejidad requieran de la participación de la Federación;

III.- Las acciones que se realicen en la materia, en bienes y zonas de jurisdicción federal;

IV.- Los originados en otros países, que afecten el equilibrio ecológico dentro del territorio nacional o las zonas sobre las que la nación ejerce derecho de soberanía y jurisdicción;

V.- Los originados dentro del territorio nacional o las zonas sobre las que la nación ejerce derechos de soberanía y jurisdicción, que afecten el equilibrio ecológico de otros países;

VI.- Los que afecten el equilibrio ecológico de dos o más entidades federativas, y

VII.- La protección de la atmósfera en zonas o en casos de fuentes emisoras de jurisdicción federal.

ARTICULO 4o.- Compete a las entidades federativas y municipios, en el ámbito de sus circunscripciones territoriales y conforme a la distribución de atribuciones que se establezcan en las leyes locales, los asuntos señalados en el artículo 6o. de la Ley y en especial:

I.- La formulación de los criterios ecológicos particulares en cada entidad federativa, que guarden congruencia con los que en su caso hubiere formulado la Federación, en las materias a que se refiere el presente artículo;

II.- La preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente que se realicen en bienes y zonas de jurisdicción de las entidades federativas y de los municipios, salvo cuando se refieran a asuntos reservados a la Federación por la Ley u otros ordenamientos aplicables;

III.- La prevención y el control de la contaminación de la atmósfera generada en zonas o por fuentes emisoras de jurisdicción estatal o municipal; y

IV.- La preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en los centros de población, en relación con los efectos derivados de los servicios de alcantarillado, limpia, mercados y centrales de abasto, panteones, rastros, tránsito y transporte locales.

ARTICULO 5o.- La aplicación de este Reglamento compete al Ejecutivo Federal por conducto de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, sin perjuicio de las atribuciones que correspondan a otras dependencias del propio Ejecutivo Federal, de conformidad con las disposiciones legales aplicables, y a las autoridades del Distrito Federal, de los Estados y de los municipios en la esfera de su competencia.

Las autoridades del Distrito Federal, de los Estados y de los municipios, podrán participar como auxiliares de la Federación, en la aplicación del presente Reglamento, para la atención de asuntos de competencia federal, en los términos de los instrumentos de coordinación correspondientes.

ARTICULO 6o.- Para los efectos de este reglamento se estará a las definiciones que se contienen en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, así como a las siguientes:

EMISION: La descarga directa o indirecta a la atmósfera de toda sustancia, en cualquiera de sus estados físicos, o de energía.

FUENTE NUEVA: Es aquella en la que se instale por primera vez un proceso o se modifiquen los existentes.

FUENTE FIJA: Es toda instalación establecida en un solo lugar, que tenga como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales, de servicios o actividades que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera.

FUENTE MOVIL: Aviones, helicópteros, ferrocarriles, tranvías, tractocamiones, autobuses integrales, camiones, automóviles, motocicletas, embarcaciones, equipo y maquinarias no fijos con motores de combustión y similares, que con motivo de su operación generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera.

FUENTE MULTIPLE: Aquella fuente fija que tiene dos o más ductos o chimeneas por las que se descargan las emisiones a la atmósfera, provenientes de un solo proceso.

INMISION: La presencia de contaminantes en la atmósfera, a nivel de piso.

LEY: La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

PLATAFORMA Y PUERTOS DE MUESTREO: Instalaciones para realizar el muestreo de gases o partículas en ductos o chimeneas.

REGLAMENTO: El reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de prevención y control de la contaminación de la atmósfera.

SECRETARIA: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología.

VERIFICACION: Medición de las emisiones de gases o partículas sólidas o líquidas a la atmósfera, provenientes de vehículos automotores.

ZONA CRITICA: Aquella en la que por sus condiciones topográficas y meteorológicas se dificulte la dispersión o se registren altas concentraciones de contaminantes a la atmósfera.

ARTICULO 7o.- Compete a la Secretaría:

I.- Formular los criterios ecológicos generales que deberán observarse en la prevención y control de la contaminación de la atmósfera, sin perjuicio de los de carácter particular que se formulen en cada entidad federativa, por las autoridades locales competentes;

II.- Expedir las normas técnicas ecológicas, en las materias objeto del reglamento, con las dependencias que correspondan, en los términos de la Ley del propio reglamento;

III.- Expedir las normas técnicas ecológicas que deberán incorporarse a las normas oficiales mexicanas que en su caso se establezcan para productos utilizados como combustibles o energéticos;

IV.- Expedir las normas técnicas ecológicas para la certificación por la autoridad competente, de los niveles de emisión de contaminantes a la atmósfera provenientes de fuentes determinadas;

V.- Determinar en coordinación con las Secretarías de Energía, Minas e Industria Paraestatal y de Comercio y Fomento Industrial la aplicación de métodos, procedimientos, partes, componentes y equipos que reduzcan las emisiones de contaminantes a la atmósfera, generados por los vehículos automotores;

VI.- Emitir dictamen técnico sobre los sistemas de monitoreo de la calidad del aire a cargo de los Estados y municipios;

VII.- Vigilar que en las zonas y en las fuentes de jurisdicción federal, se cumplan las disposiciones del reglamento y se observen las normas técnicas ecológicas aplicables;

VIII.- Convenir y, en su caso, requerir la instalación de equipos de control de emisiones contaminantes a la atmósfera con quienes realicen actividades contaminantes en zonas conurbadas ubicadas en dos o más entidades federativas, y cuando se trate de bienes o zonas de jurisdicción federal;

IX.- Fomentar y promover ante las autoridades competentes el uso de métodos, procedimientos, partes, componentes y equipos que reduzcan la generación de contaminantes a la atmósfera;

X.- Establecer los procedimientos a los que deberán sujetarse los centros de verificación obligatoria de los vehículos de transporte público federal autorizados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes;

XI.- Promover en coordinación con las autoridades competentes, la instalación de industrias que utilicen tecnologías y combustibles que generen menor contaminación a la atmósfera, en zonas que se hubiesen determinado aptas para uso industrial, próximas a áreas habitacionales;

XII.- Promover ante las autoridades competentes que en la determinación de usos del suelo que definan los programas de desarrollo urbano respectivos, se considere la compatibilidad de la actividad industrial con otras actividades productivas y se tomen en cuenta las condiciones topográficas, y meteorológicas, para asegurar la adecuada dispersión de contaminantes atmosféricos;

XIII.- Promover en coordinación con los gobiernos de los Estados y municipios, el establecimiento de sistemas de verificación del parque vehicular;

XIV.- Propiciar el fortalecimiento de la conciencia ecológica, a través de los medios de comunicación masiva y promover la participación social para la prevención y control de la contaminación a la atmósfera;

XV.- Prestar asistencia técnica a los gobiernos del Distrito Federal, de los Estados y de los municipios, cuando así lo soliciten, para la prevención y control de la contaminación de la atmósfera generada en zonas o por fuentes de jurisdicción local;

XVI.- Dictaminar sobre el otorgamiento de estímulos fiscales en los casos previstos por el artículo 12 del Reglamento;

XVII.- Promover ante las autoridades de educación competentes, la incorporación de contenidos ecológicos en los ciclos educativos, así como el desarrollo de planes y programas para la formación de especialistas en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica;

XVIII.- Promover el desarrollo de investigaciones sobre las causas y efectos de los fenómenos ambientales, así como el desarrollo de técnicas y procedimientos tendientes a la prevención y control de la contaminación de la atmósfera;

XIX.- Promover la incorporación de contenidos ecológicos en los programas de las comisiones mixtas de seguridad e higiene;

XX.- Promover ante las autoridades componentes, el desarrollo de programas de capacitación y adiestramiento en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica en los centros de trabajo;

XXI.- Expedir los instructivos, formatos y manuales necesarios para el cumplimiento del reglamento;

XXII.- Vigilar el cumplimiento de los procedimientos de verificación, así como de las normas técnicas ecológicas previstas en el reglamento, y

XXIII.- Las demás que le confiere el reglamento y otras disposiciones legales aplicables.

ARTICULO 8o.- Sin perjuicio de lo que establezcan otras disposiciones legales aplicables, compete a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes:

I.- Autorizar el establecimiento de centros de verificación obligatoria de los vehículos del transporte público federal;

II.- Establecer el programa para la verificación de los vehículos del transporte público federal;

III.- Llevar el registro de los centros de verificación obligatoria de los vehículos del transporte público federal;

IV.- Determinar las tarifas que regirán en la prestación de los servicios de verificación obligatoria que lleven a cabo los centros autorizados en los términos del reglamento, y

V.- Expedir las calcomanías de baja emisión previstas en el reglamento.

ARTICULO 9o.- En el Distrito Federal la Secretaría ejercerá las atribuciones a que se refiere el artículo 3o. del reglamento y el Departamento del Distrito Federal ejercerá las que se prevén para las autoridades locales, sin perjuicio de las que competan en la Asamblea de Representantes del Distrito Federal, ajustándose a las siguientes disposiciones especiales:

A) Corresponde a la Secretaría:

I.- Prevenir y controlar la contaminación de la atmósfera generada en el Distrito Federal por fuentes fijas que no funcionen como establecimientos mercantiles y espectáculos públicos, y

II.- Establecer y operar los sistemas de monitoreo de la contaminación atmosférica en el Distrito Federal.

B) Corresponde al Departamento del Distrito Federal:

I.- Prevenir y controlar la contaminación de la atmósfera generada en el Distrito Federal por fuentes fijas que funcionen como establecimientos mercantiles y espectáculos públicos;

II.- Operar la red regional de laboratorios de análisis de la contaminación atmosférica;

III.- Determinar los criterios ecológicos que serán incorporados en los programas de desarrollo urbano y demás instrumentos aplicables en esta materia;

IV.- Participar, en el ámbito de su competencia, en la formulación y ejecución de los programas especiales que establezca la Federación para la restauración del equilibrio ecológico, en aquellas zonas y áreas del Distrito Federal que presenten graves desequilibrios;

V.- Vigilar la observancia de las declaratorias que expida el Ejecutivo Federal para regular las actividades que generen contaminación atmosférica en las zonas y áreas del Distrito Federal que presenten graves desequilibrios ecológicos;

VI.- Observar las normas técnicas ecológicas en la prestación de los servicios públicos de alcantarillado, limpia, mercados y centrales de abasto, panteones, rastros, tránsito y transportes locales, y

VII.- Inspeccionar, vigilar e imponer sanciones en los asuntos de su competencia.

ARTICULO 10.- Serán responsables del cumplimiento de las disposiciones del reglamento y de las normas técnicas ecológicas que de él se deriven, las personas físicas o morales, públicas o privadas, que pretendan realizar o que realicen obras o actividades por las que se emitan a la atmósfera olores, gases o partículas sólidas o líquidas.

ARTICULO 11.- Para los efectos del reglamento se consideran:

I.- Zonas de jurisdicción federal, las señaladas en las disposiciones aplicables y, en especial las siguientes:

a) Los sitios ocupados por todas las instalaciones de las terminales de transporte público federal, terrestre, aéreo y acuático;

b) Los parques industriales localizados en bienes del dominio público de la Federación; en los términos de la Ley General de Bienes Nacionales, y

c) La zona federal marítimo-terrestre.

II.- Fuentes de jurisdicción federal:

a) Las instalaciones, obras o actividades industriales, comerciales y de servicios que realicen las dependencias y entidades de la administración pública federal, en los términos de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal;

b) La industria del asbesto, así como la prevista en la fracción III del artículo 29 de la Ley;

c) La industria que se localice en la zona conurbada del Distrito Federal;

d) Las obras o actividades localizadas en un Estado, cuyas emisiones a la atmósfera contaminen o afecten el equilibrio ecológico de otro u otros Estados, cuando así lo determine la Secretaría o lo solicite a la Federación el Estado afectado por las emisiones contaminantes a la atmósfera;

e) Las obras o actividades localizadas en el territorio nacional que puedan afectar el equilibrio ecológico de otros paises;

f) Los vehículos automotores hasta en tanto no salgan de la planta de producción;

g) El transporte público federal, y

h) Aquellas que por su naturaleza y complejidad requieran la intervención federal.

ARTICULO 12.- Se consideran prioritarias para el otorgamiento de estímulos fiscales las actividades relacionadas con la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.

Para el otorgamiento de dichos estímulos, las autoridades competentes considerarán a quienes:

I.- Adquieran, instalen y operen equipos para el control de emisiones de contaminantes a la atmósfera;

II.- Fabriquen, instalen o proporcionen mantenimiento a equipos de filtrado, combustión, control y en general de tratamiento de emisiones que contaminen la atmósfera;

III.- Realicen investigaciones de tecnología cuya aplicación disminuya la generación de emisiones contaminantes a la atmósfera, y

IV.- Ubiquen y relocalicen sus instalaciones para evitar emisiones contaminantes a la atmósfera en zonas urbanas.

ARTICULO 13.- Para la protección a la atmósfera se considerarán los siguientes criterios:

I.- La calidad del aire debe ser satisfactoria en todos los asentamientos humanos y las regiones del país, y

II.- Las emisiones de contaminantes a la atmósfera, sean de fuentes artificiales o naturales, fijas o móviles, deben ser reducidas o controladas, para asegurar una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico.

ARTICULO 14.- La Secretaría, previos los estudios correspondientes, promoverá ante las autoridades competentes la reubicación de las fuentes fijas, cuando las condiciones topográficas y meteorológicas del sitio en el que se ubican dificulten la adecuada dispersión de contaminantes a la atmósfera, cuando la calidad del aire así lo requiera, o cuando las caraterísticas de los contaminantes constituyan un riesgo inminente de desequilibrio ecológico.

ARTICULO 15.- La Secretaría podrá promover ante las autoridades federales o locales competentes, con base en los estudios que haga para ese efecto, la limitación o suspensión de la instalación o funcionamiento de industrias, comercios, servicios, desarrollos urbanos o cualquier actividad que afecte o pueda afectar el ambiente o causar desequilibrio ecológico.

CAPITULO II

DE LA EMISION DE CONTAMINANTES A LA ATMOSFERA, GENERADA POR FUENTES FIJAS

ARTICULO 16.- Las emisiones de olores, gases, así como de partículas sólidas y líquidas a la atmósfera que se generen por fuentes fijas, no deberán exceder los niveles máximos permisibles de emisión e inmisión, por contaminantes y por fuentes de contaminación que se establezcan en las normas técnicas ecológicas que para tal efecto expida la Secretaría en coordinación con la Secretaría de Salud, con base en la determinación de los valores de concentración máxima permisible para el ser humano de contaminantes en el ambiente que esta última determina.

Asimismo, y tomando en cuenta la diversidad de tecnologías que presentan las fuentes, podrán establecerse en la norma técnica ecológica diferentes valores al determinar los niveles máximos permisibles de emisión o inmisión, para un mismo contaminante o para una misma fuente, según se trate de:

I.- Fuentes existentes;

II.- Nuevas fuentes, y

III.- Fuentes localizadas en zonas críticas.

La Secretaría en coordinación con la Secretaría de Salud, y previos los estudios correspondientes, determinará en la norma técnica ecológica respectiva, las zonas que deben considerarse críticas.

ARTICULO 17.- Los responsables de las fuentes fijas de jurisdicción federal, por las que se emitan olores, gases o partículas sólidas o líquidas a la atmósfera estarán obligados a:

I.- Emplear equipos y sistemas que controlen las emisiones a la atmósfera, para que éstas no rebasen los niveles máximos permisibles establecidos en las normas técnicas ecológicas correspondientes;

II.- Integrar un inventario de sus emisiones contaminantes a la atmósfera, en el formato que determine la Secretaría;

III.- Instalar plataformas y puertos de muestreo;

IV.- Medir sus emisiones contaminantes a la atmósfera, registrar los resultados en el formato que determine la Secretaría y remitir a ésta los registros, cuando así lo solicite;

V.- Llevar a cabo el monitoreo perimetral de sus emisiones contaminantes a la atmósfera, cuando la fuente de que se trate se localice en zonas urbanas o suburbanas, cuando colinde con áreas naturales protegidas, y cuando por sus características de operación o por sus materias primas, productos y subproductos, puedan causar grave deterioro a los ecosistemas, a juicio de la Secretaría;

VI.- Llevar una bitácora de operación y mantenimiento de sus equipos de proceso y de control;

VII.- Dar aviso anticipado a la Secretaría del inicio de operación de sus procesos, en el caso de paros programados y de inmediato en el caso de que éstos sean circunstanciales, si ellos pueden provocar contaminación;

VIII.- Dar aviso inmediato a la Secretaría en el caso de falla del equipo de control, para que ésta determine lo conducente, si la falla puede provocar contaminación, y

IX.- Las demás que establezcan la Ley y el reglamento.

ARTICULO 18.- Sin perjuicio de las autorizaciones que expidan otras autoridades competentes, las fuentes fijas de jurisdicción federal que emitan o puedan emitir olores, gases o partículas sólidas o líquidas a la atmósfera, requerirán licencia de funcionamiento expedida por la Secretaría, la que tendrá una vigencia indefinida.

ARTICULO 19.- Para obtener la licencia de funcionamiento a que se refiere el artículo anterior, los responsables de las fuentes, deberán presentar a la Secretaría, solicitud por escrito acompañada de la siguiente información y documentación:

I.- Datos generales del solicitante;

II.- Ubicación;

III.- Descripción del proceso;

IV.- Distribución de maquinaria y equipo;

V.- Materias primas o combustibles que se utilicen en su proceso y forma de almacenamiento;

VI.- Transporte de materias primas o combustibles al área de proceso;

VII.- Transformación de materias primas o combustibles;

VIII.- Productos, subproductos y desechos que vayan a generarse;

IX.- Almacenamiento, transporte y distribución de productos y subproductos;

X.- Cantidad y naturaleza de los contaminantes a la atmósfera esperados;

XI.- Equipos para el control de la contaminación a la atmósfera que vayan a utilizarse, y

XII.- Programa de contingencias, que contenga las medidas y acciones que se llevarán a cabo cuando las condiciones metereológicas de la región sean desfavorables; o cuando se presten emisiones de olores, gases, así como de partículas sólidas y líquidas extraordinarias no controladas.

La información a que se refiere este artículo deberá presentarse en el formato que determine la Secretaría, quien podrá requerir la información adicional que considere necesaria y verificar en cualquier momento, la veracidad de la misma.

ARTICULO 20.- Una vez recibida la información a que se refiere el artículo anterior, la Secretaría otorgará o negará la licencia de funcionamiento correspondiente, dentro de un plazo de treinta días hábiles contados a partir de la fecha en que se cuente con toda la información requerida.

En el caso de otorgarse la licencia, en ésta se precisará:

I.- La periodicidad con que deberá remitirse a la Secretaría el inventario de sus emisiones;

II.- La periodicidad con que deberá llevarse a cabo la medición y el monitoreo a que se refieren las fracciones IV y V del artículo 17;

III.- Las medidas y acciones que deberán llevarse a cabo en el caso de una contingencia, y

IV.- El equipo y aquellas otras condiciones que la Secretaría determine, para prevenir y controlar la contaminación de la atmósfera.

La Secretaría podrá fijar en la licencia de funcionamiento, niveles máximos de emisión específicos para aquellas fuentes fijas que por sus características especiales de construcción o por las peculiaridades en los procesos que comprenden no puedan encuadrarse dentro de las normas técnicas ecológicas que establezcan niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera .

ARTICULO 21.- Una vez otorgada la licencia de funcionamiento, el responsable de la fuente fija deberá remitir a la Secretaría, en el mes de febrero de cada año y en el formato que ésta determine una cédula de operación que contenga la información y documentación prevista en el artículo 19 del reglamento.

ARTICULO 22.- La Secretaría podrá modificar con base en la información contenida en la cédula de operación a que se refiere el artículo anterior, los niveles máximos de emisión específicos que hubiere fijado en los términos del artículo 20, cuando:

I.- La zona en la que se ubique la fuente se convierta en una zona crítica;

II.- Existan tecnologías de control de contaminantes a la atmósfera más eficientes, y

III.- Existan modificaciones en los procesos de producción empleados por la fuente.

ARTICULO 23.- Las emisiones de contaminantes atmosféricos que se generen por las fuentes fijas de jurisdicción federal, deberán canalizarse a través de ductos o chimeneas de descarga.

Cuando por razones de índole técnica no puedan cumplirse con lo dispuesto por este artículo, el responsable de la fuente deberá presentar a la Secretaría un estudio justificativo para que está determine lo conducente.

ARTICULO 24.- Los ductos o las chimeneas a que se refiere el artículo anterior, deberán tener la altura efectiva necesaria, de acuerdo con la norma técnica ecológica correspondiente, para dispersar las emisiones contaminantes.

ARTICULO 25.- Las mediciones de la emisiones contaminantes a la atmósfera, se llevarán a cabo conforme a los procedimientos de muestreo y cuantificación establecidos en las normas oficiales mexicanas o, en su caso, en las normas técnicas ecológicas correspondientes. Para evaluar la emisión total de contaminantes atmosféricos de una fuente múltiple, se deberán sumar las emisiones individuales de las chimeneas existentes.

ARTICULO 26.- Los responsables de las fuentes fijas de jurisdicción federal, deberán conservar en condiciones de seguridad las plataformas y puertos de muestreo y mantener calibrados los equipos de medición, de acuerdo con el procedimiento previsto en la norma oficial mexicana correspondiente.

ARTICULO 27.- Sólo se permitirá la combustión en cielo abierto en zonas de jurisdicción federal, cuando se efectúe con permiso de la Secretaría para adiestrar y capacitar al personal encargado del combate de incendios.

Para obtener el permiso a que se refiere el párrafo anterior, el interesado deberá presentar a la Secretaría solicitud por escrito, cuando menos diez días hábiles de anterioridad a la fecha en que se tenga programado el evento, con la siguiente información y documentación:

I.- Croquis de localización del predio, indicando el lugar preciso en el que se efectuarán las combustiones, así como las construcciones y colindancias más próximas y las condiciones de seguridad que imperan en el lugar;

II.- Programa calendarizado, en el que se precise la fecha y horarios en los que tendrán lugar las combustiones, y

III.- Tipos y cantidades de combustible que se incinerará.La Secretaría podrá suspender de manera temporal o definitiva el permiso a que se refiere este artículo, cuando se presente alguna contingencia ambiental en la zona.

CAPITULO III

DE LA EMISION DE CONTAMINANTES A LA ATMOSFERA GENERADA POR FUENTES MOVILES

ARTICULO 28.- La emisiones de olores, gases, así como de partículas sólidas y líquidas a la atmósfera que se generen por fuentes moviles, no deberán exceder los niveles máximos permisibles de emisión que se establezcan en las normas técnicas ecológicas que expida la Secretaría en coordinación con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial y de Energía, Minas e Industria Paraestatal, tomando en cuenta los valores de concentración máxima permisible para el ser humano de contaminantes en el ambiente determinados por la Secretaría de Salud.

ARTICULO 29.- Los fabricantes de vehículos automotores deberán aplicar los métodos, procedimientos, partes, componentes y equipos que aseguren que no se rebasarán los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera que establezcan las normas técnicas ecológicas correspondientes.

La certificación de los niveles máximos permisibles de emisión deberá sujetarse a los procedimientos y llevarse a cabo con los equipos que determinen las normas técnicas ecológicas correspondientes.

ARTICULO 30.- La Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, de acuerdo con sus facultades, únicamente autorizará la fabricación y ensamble de vehículos automotores que no rebasen los niveles máximos de emisión de contaminantes a la atmósfera previstos en las normas técnicas ecológicas correspondientes.

La Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, deberá verificar que el procedimiento de certificación de emisiones contaminantes a la atmósfera se ajuste a lo dispuesto en las normas técnicas ecológicas aplicables.

ARTICULO 31.- Los concesionarios del servicio de transporte público federal deberán tomar las medidas necesarias, para asegurar que las emisiones de sus vehículos no rebasarán los niveles máximos de emisión de contaminantes a la atmósfera, que establezcan las normas técnicas ecológicas correspondientes.

ARTICULO 32.- Para efecto de lo dispuesto en el artículo anterior, los propietarios de los vehículos destinados al transporte público federal terrestre, deberán someter a verificación sus vehículos en el período y en el centro de verificación que corresponda, conforme al programa que formule la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Asimismo deberán cubrir los productos que por este concepto establezca la legislación aplicable.

ARTICULO 33.- El programa al que se refiere el artículo anterior será publicado en el Diario Oficial de la Federación, en la Gaceta SEDUE y en los órganos oficiales locales, en el mes de enero de cada año.

ARTICULO 34.- Los centros de verificación expedirán una constancia sobre los resultados de la verificación del vehículo. Dicha constancia deberá contener la siguiente información:

I.- Fecha de verificación;

II.- Identificación del centro de verificación obligatoria y de la persona que efectuó la verificación;

III.- Números de registro y de motor, tipo, marca y año-modelo del vehículo y nombre y domicilio del propietario;

IV.- Identificación de las normas técnicas ecológicas aplicadas en la verificación;

V.- Declaración en la que se indique que las emisiones a la atmósfera del vehículo rebasan o no los niveles máximos permisibles previstos en las normas técnicas ecológicas aplicables, y

VI.- Las demás que se determinen en el programa de verificación.

Cuando la constancia a que se refiere este artículo establezca que el vehículo de que se trate, no rebasa los niveles máximos permisibles previstos en las normas técnicas ecológicas aplicables, el original de dicha constancia deberá ser conservado por el propietario del vehículo. Copia de la misma deberá presentarse ante la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, junto con los documentos necesarios para efectuar el trámite de revalidación de vigencia de la matrícula vehicular.

ARTICULO 35.- Cuando del resultado de la verificación en los centros autorizados, se determine en la constancia correspondiente que los vehículos de transporte público federal terrestre, rebasan los niveles máximos de emisión de contaminantes a la atmósfera, establecidos en las normas técnicas ecológicas correspondientes, los propietarios deberán efectuar las reparaciones que procedan.

Una vez efectuada la reparación de los vehículos, éstos deberán someterse a una nueva verificación en alguno de los centros de verificación autorizados.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes únicamente revalidará la vigencia de la matrícula vehícular, cuando exista constancia expedida por un centro autorizado, en la que se determine que el vehículo de que se trate no rebasa los niveles máximos permisibles previstos en las normas técnicas ecológicas correspondientes.

ARTICULO 36.- La Secretaría podrá promover ante la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, la suspensión o, en su caso, la cancelación del permiso para circular por las vías generales de comunicación, de aquellos vehículos de transporte público federal terrestre que, de manera reincidente, violen las disposiciones del reglamento y las normas técnicas ecológicas, independientemente de que se apliquen las sanciones que procedan.

ARTICULO 37.- Los interesados en obtener autorización de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para establecer y operar centros de verificación obligatoria de los vehículos de transporte público federal terrestre, deberán presentar a dicha dependencia solicitud por escrito con la siguiente información y documentación:

I.- Nombre, denominación o razón social y domicilio del solicitante;

II.- Los documentos que acrediten su capacidad técnica y económica para realizar la verificación;

III.- Ubicación y superficie de terreno destinada a realizar el servicio, considerando el espacio mínimo necesario para llevarlo a efecto en forma adecuada, sin que se provoquen problemas de vialidad;

IV.- Infraestructura y equipo que se empleará para llevar a cabo la verificación;

V.- Descripción del procedimiento de verificación, y

VI.- Los demás que sean requeridos por la Secretaría.

ARTICULO 38.- Presentada la solicitud , la Secretaría de Comunicaciones y Transportes procederá a su análisis y evaluación. Dentro de un plazo no mayor de sesenta días naturales a partir de la fecha en que se hubiere recibido dicha solicitud, notificará la resolución en la que se otorgue o niegue la autorización correspondiente.

Dentro del plazo a que se refiere el párrafo anterior, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes podrá promover ante la Secretaría la formulación de un dictamen técnico al respecto, el cual deberá ser expedido en un plazo no mayor de treinta días naturales a partir de recibida la promoción. Si transcurrido el plazo la Secretaría no hubiere emitido dictamen expreso, se extenderá otorgado en sentido aprobatorio.

El dictamen podrá determinar si el proyecto cumple con los requerimientos técnicos, si es necesaria su modificación para la satisfacción de dichos requerimientos o si el proyecto no puede autorizarse por no satisfacer la normatividad aplicable.

Otorgada la autorización para establecer, equipar y operar un centro de verificación, se notificará al interesado, quien deberá estar en aptitud de iniciar la operación dentro del plazo señalado en la propia autorización, el cual no podrá ser menor de treinta días naturales prorrogables a partir de su notificación.

Si transcurrido el plazo señalado, no se hubiere iniciado la operación del centro de verificación de que se trate, la autorización otorgada quedará sin efectos.

La autorización para operar los centros de verificación a que se refiere este reglamento establecerá el período de su vigencia, transcurrido el cual podrá ser revalidada previa solicitud de los interesados, debiendo en su caso, satisfacer los requisitos previstos para el otorgamiento de toda autorización

ARTICULO 39.- Los centros de verificación vehicular autorizados deberán:

I.- Operar conforme a los procedimientos de verificación que establezca la Secretaria, y

II.- Mantener sus instalaciones y equipos en un estado de funcionamiento que garantice la adecuada prestación de sus servicios.

ARTICULO 40.- El personal que tenga a su cargo la verificación en los centros autorizados, deberá contar con la capacitación técnica necesaria para el cabal cumplimiento de sus funciones

CAPITULO IV

DEL SISTEMA NACIONAL DE INFORMACION DE LA CALIDAD DEL AIRE

ARTICULO 41.- La Secretaría establecerá y mantendrá actualizado un sistema nacional de información de la calidad del aire.
Este sistema se integrará con los datos que resulten de:

I.- El monitoreo atmosférico que lleven a cabo las autoridades competentes en el Distrito Federal, así como en los Estados y municipios, y

II.- Los inventarios de las fuentes de comunicación de jurisdicción, federal y local, así como de sus emisiones.

ARTICULO 42.- La Secretaría establecerá y operará el sistema de monitoreo de la calidad del aire en el Distrito federal y zona conurbada, y mantendrá un registro permanente de las concentraciones de contaminantes a la atmósfera que este reporte.

Las autoridades competentes en la zona conurbada del Distrito Federal auxiliarán a la Secretaría en la operación del sistema de monitoreo en sus circunscripciones territoriales, en los términos de los instrumentos de coordinación que al efecto se celebren.

Por su parte la Secretaría prestará el apoyo técnico que requieren los Estados y Municipios para establecer y operar sus sistemas de monitoreo de la calidad del aire.

ARTICULO 43.- El establecimiento y operación de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire, deberán sujetarse a las normas técnicas ecológicas que al efecto expida la Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Salud en lo referente a la salud humana.

ARTICULO 44.- La Secretaría, mediante acuerdos de coordinación, promoverá ante los Estados y municipios, la incorporación de sus sistemas de monitoreo, así como de sus inventarios de zonas y fuentes de jurisdicción local, al sistema nacional de información de la calidad del aire.

Asimismo, promoverá ante el Departamento del Distrito Federal, la incorporación de sus inventarios de zonas y fuentes, a dicho sistema nacional.

ARTICULO 45.- La Secretaría mantendrá actualizado el inventario de fuentes de jurisdicción federal, así como de sus emisiones, con el propósito de contar con un banco de datos que le permita formular las estrategias necesarias para el control de la contaminación atmosférica.

Este inventario se integrará con la información que se presente en los términos del artículo 18 del reglamento.

CAPITULO V

DE LAS MEDIDAS DE CONTROL Y DE SEGURIDAD Y SANCIONES.

ARTICULO 46.- Las infracciones de carácter administrativo a los preceptos de la Ley y del reglamento serán sancionadas por la Secretaría en asuntos de competencia federal, conforme a lo que establece el reglamento, con una o más de las siguientes sanciones:

I.- Multa por el equivalente de veinte a veinte mil días de salario mínimo general vigente en el Distrito Federal, en el momento de poner la sanción;

II.- Clausura temporal o definitiva, parcial o total, y

III.- Arresto administrativo hasta por treinta y seis horas.

Las sanciones a que se refiere este artículo, se aplicarán sin perjuicio de las sanciones penales que procedan.

ARTICULO 47.- Sin perjuicio de otras sanciones que se impongan conforme a lo dispuesto en este reglamento, procederá la revocación de la autorización para establecer y operar centros de verificación obligatoria de los vehículos del transporte público federal terrestre, en los siguientes casos:

I.- Cuando las verificaciones no se realicen conforme a las normas técnicas ecológicas aplicables, o en los términos de la autorización otorgada;

II.- Cuando en forma dolosa o negligente se alteren los procedimientos de verificación establecidos por la Secretaría;

III.- Cuando se alteren las tarifas autorizadas, y

IV.- Cuando quien preste los servicios de verificación, deje de tener la capacidad o las condiciones técnicas necesarias para la debida prestación de este servicio.

ARTICULO 48.- Si una vez impuestas las sanciones a que se refieren los artículos anteriores y vencido el plazo en su caso concedido para subsanar la o las infracciones cometidas, resultare que dicha infracción o infracciones aún subsistieran, podrán imponerse multas por cada día que transcurra sin obedecer el mandato sin que el total de las multas que en estos casos se impongan, exceda de veinte mil días de salario mínimo general vigente en el Distrito Federal en el momento de imponer la sanción.

En caso de reincidencia el monto de la multa podrá ser hasta por dos veces el monto originalmente impuesto, sin exceder del doble del máximo permitido.

En los casos en que el infractor solucionare la causa que dió origen al desequilibrio ecológico o deterioro al ambiente, la Secretaría podrá modificar o revocar la sanción impuesta.

ARTICULO 49.- La Secretaría podrá realizar los actos de inspección y vigilancia necesarios para verificar la debida observancia del reglamento. Para los efectos establecidos en este artículo, la Secretaría estará a lo que dispongan los ordenamientos contenidos en el título sexto de la Ley.

ARTICULO 50.- Las infracciones en asuntos de competencia de las entidades federativas y de los municipios, serán sancionadas administrativamente por las autoridades estatales, municipales o del Distrito Federal dentro de sus respectivas circunscripciones territoriales, conforme a lo dispuesto por los ordenamientos locales aplicables.

ARTICULO 51.- Cuando por infracción a las disposiciones de la Ley y del reglamento en materia de contaminación a la atmósfera se hubieren ocasionado daños o perjuicios, el o los interesados podran solicitar a la Secretaría la formulación de un dictamen técnico al respecto.

ARTICULO 52.- Toda persona podrá denunciar ante la Secretaría, o ante otras autoridades federales o locales según su competencia, todo hecho, acto u omisión de competencia de la Federación, que produzca desequilibrio ecológico o daños al ambiente, contraviniendo las disposiciones de la Ley y del reglamento en materia de contaminación atmosférica.

TRANSITORIOS

PRIMERO.- El presente reglamento entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

SEGUNDO.- Se abroga el reglamento para la prevención y control de la contaminación atmosférica originada por la emisión de humos y polvos, del 8 de Septiembre de 1971, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 17 de Septiembre de 1971, y se derogan las demás disposiciones que se opongan a lo dispuesto por el presente reglamento.

TERCERO.- Las personas fisicas o morales públicas o privadas que a la fecha de entrada en vigor del presente ordenamiento, operen o administren bajo cualquier titulo jurídico algunas de las fuentes de jurisdicción federal o de la fuentes ubicadas en zonas de jurisdicción federal a que se refiere este reglamento, contarán con un plazo de noventa días naturales para presentar los documentos y cumplir con las obligaciones exigidas en el mismo, salvo cuando las mismas obligaciones hubieren sido ya satisfechas en cumplimiento de las disposiciones que se derogan.

CUARTO.- Los procedimientos y recursos administrativos que estuvieren en curso al entrar en vigor el reglamento, se continuarán conforme a las disposiciones que les dieron origen.

QUINTO.- Hasta en tanto la Secretaría expida formatos, instructivos y manuales a los que se refiere el reglamento, los interesados en llevar a cabo procedimientos conforme al mismo, presentarán por escrito además de la información que este ordenamiento se señale la que en su oportunidad les requiera la Secretaría

SEXTO.- Hasta en tanto las legislaturas locales dicten las leyes y, en su caso, los ayuntamientos las ordenanzas, reglamentos y bandos de policía y buen gobierno para prevenir el control la contaminación atmosférica en asuntos que conforme a la Ley son de competencia de Estados y municipios, corresponderá a la Federación aplicar el reglamento en el ámbito local, coordinándose para ello con las autoridades estatales y, con su participación, con los municipios que correspondan, según el caso.

En el caso del Distrito Federal, corresponderá al Departamento del Distrito Federal aplicar el reglamento en asuntos de competencia local.

Dado en la residencia del Poder Ejecutivo Federal, en la ciudad de México, Distrito Federal, a los veintitrés días del mes de noviembre de mil novecientos ochenta y ocho.- Miguel de la Madrid H.- Rúbrica.- El Secretario de Comercio y Fomento Industrial, Héctor Hernández Cervantes.- Rúbrica.- El Secretario de Comunicaciones y Transportes, Daniel Díaz Díaz.- Rúbrica.- El Secretario de Desarrollo Urbano y Ecología, Gabino Fraga Mouret.- Rúbrica.- El Secretario de Salud, Guillermo Soberón Acevedo.- Rúbrica.- El Jefe del Departamento del Distrito Federal, Ramón Aguirre Velázquez.- Rúbrica.

9.2 APENDICE II

$A^{\bullet}$: Especie química con un electrón no apareado.
A^{-} : Especie química con carga negativa (reactivo electrófilo o anión).
AC : Control del Analizador de gas de cola.
AI : Analizador de Oxígeno.
Aire SCR : Aire de reactor SUPERCLAUS en TMPD.
AR : Analizador de Gases de salida (de chimenea).
Ar : Argón.
AT : Transmisor de Análisis.
C : Carbono monoatómico.
CAUE : Costo Anual Uniforme Equivalente.
CBA : Cold Bed Absorption (absorción en lecho frío).
CH_4 : Metanp.
C_2H_4 : Etano.
C_3H_8 : Propano.
CO : Monóxido de carbono.
CO_2 : Dióxido de carbono.
Co-Mo : Cobalto-Molibdeno.
COS : Sulfuro de carbonilo.
COS COLA (B.S) : COS en el gas de cola en Base Seca %mol.
COS COLA (kgmol/hr) : COS en el gas de cola en kgmol/hr.
cp : centipoise.
CPG : Complejo Procesador de Gas.
CS_2 : Disulfuro de carbonilo.
CS_2 COLA (B.S) : CS_2 en el gas de cola en Base Seca %mol.
CS_2 COLA (kgmol/hr) : CS_2 en el gas de cola en kgmol/hr.
DIAP : Di-isopropanolamina.
EPA : Enviroment Protection Ambiental (Agencia Protección al Ambiente).
FC : Control de Flujo.
FeS : Sulfuro de hierro.
FI : Indicador de Flujo.
FR : Registro de Flujo.
FT : Transmisor de Flujo.
FY : Convertidor de señal.
GAS (mmpcd) : Gas ácido húmedo en mmpcd.
H_2 : Hidrógeno diátomico.
H'Cs : Hidrocarburos.
H_2O : Agua.
H_2O AIRE (B.H) : Agua del aire en Base Húmeda %mol.
HR (AIRE) : Húmedad Relativa del aire.
H_2S : Ácido Sulfhídrico.
H_2S COLA (B.S) : Ácido Sulfhídrico en el gas de cola en Base Seca %mol.

H_2S COLA (kgmol/hr) : Ácido Sulfhídrico en el gas de cola en kgmol/hr.
H_2S GAS (B.H) : Ácido Sulfhídrico en la alimentación de gas ácido en mmpcd.
H_2SO_3 : Ácido sulfuroso.
H_2S_x : Polisulfuros de Hidrógeno.
i : Tasa de interés.
LC : Control de Nivel.
LI : Indicador de Nivel.
Ln VP AIRE : Logaritmo natural de la presión de vapor del aire.
LS : Switch de Nivel.
MBD : Miles de Barriles por Día.
MCRC : Maximum Claus Recovery Concept (Concepto Máximo de Recuperación de Azufre).
MMPCD : Millones de Pies Cúbicos por Día.
n : Tiempo.
N_2 : Nitrógeno diátomico.
N_2 AIRE (B.H) : Nitrógeno del aire en Base Húmeda %mol.
N_2 AIRE (B.S): Nitrógeno del aire en Base Seca %mol.
N_2 COLA (B.S) : Nitrógeno en la gas de cola en Base Seca %mol.
N_2 ENT (kgmol/día) : Nitrógeno en la entrada en kgmol/día.
N_2 ENT (kgmol/hr) : Nitrógeno en la entrada en kgmol/hr.
N_2 ENT (mmpcd) : Nitrógeno en la entrada en mmpcd.
N_2 ENT (TON/día) : Nitrógeno en la entrada en TON/día.
NH_3 : Amoniaco.
Ni-Mo : Niquel-Molibdeno.
NOM : Norma Oficial Mexicana.
NO_x : Oxidos de nitrógeno.
O_2 : Oxígeno dimolecular.
OH^- : Ión hidróxilo (reactivo nucleófilo).
P AIRE (kg/cm^2) : Presión del aire en kg/cm^2.
PC : Control de Presión.
PEMEX : Petróleos Mexicanos.
PGPB : Pemex Gas y Petroquímica Básica.
ppm (p) : Partes por millón en peso.
ppm (v) : Partes por millón en volumen.
PROFEPA : Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.
Ps (kg/cm^2) : Presión del azufre en kg/cm^2.
S : Azufre monoatómico.
S^* : Especie de azufre con un electrón sin aparear.
S^0 : Especie de azufre con carga neutra.
S_1 : Azufre líquido.
S_2 : Azufre diátomico.
S_6 : Azufre con seis átomos.
S_8 : Azufre con ocho átomos.

Sc : Azufre contenido en los compuestos del gas de cola a la salida del coalescedor en kgmol/hr.
SCOT : Shell Claus off-gas Treating (Tratamiento de Gas Claus con Torres).
SEMARNAF : Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
SF : Azufre presente en la alimentación de gas ácido en kgmol/hr.
S GAS (kgmol/día) : Azufre presente en la alimentación de gas ácido en kgmol/día.
S GAS (TON/día) : Azufre presente en la alimentación de gas ácido en TON/día.
$S_n = S_x$: Alótropo del azufre.
SO_2 : Dióxido de azufre.
SO_2 COLA (B.S) : Dióxido de azufre en el gas de cola en Base Seca %mol.
SO_2 COLA (kgmol/hr) : Dióxido de azufre en el gas de cola en kgmol/hr.
SO_3 : Trióxido de azufre.
SR : Recuperación de azufre en kgmol/hr.
SRU's : Unidades Recuperadoras de Azufre.
STG : Azufre presente en el gas de cola a la salida del coalescedor en kgmol/hr.
Sv : Vapor de azufre a la salida del coalescedor en kgmol/hr.
Sv %mol : Vapor de azufre en %mol.
T AIRE : Temperatura del aire en grados centígrados.
TGCU : Unidad de Tratamiento de Gas de Cola.
TiO_2 : Oxido de titanio.
TMPD : Tonelada Métricas por Día.
TON/D : Toneladas por día.
T S : Temperatura de azufre en grados centígrados.
USD : Dólares estadounidenses.
VP AIRE (kpa) : Presión de vapor del aire en kilopascals.
VP AIRE (psi) : Presión de vapor del aire en psi.
VS : Valor de Salvamento.

9.3 GLOSARIO

Absorción: Proceso por el cual un componente es transferido entre dos fases en contacto, integrándose en una de ellas.
Adsorción: Proceso de separación para remover impurezas basado en el hecho de que ciertos materiales altamente porosos, fijan ciertos tipos de moléculas en su superficie.
Adsorción química: Reacción química entre el reactivo y la superficie del catalizador; generalmente irreversible.
Apnea: Pausa respiratoria.
Átomo: Unidad más pequeña posible de un elemento químico, es indivisible.
Azufre elemental: Azufre líquido puro.
Cantidad estequiométrica: Cantidad necesaria para que un componente reaccione completamente en una reacción dada.
Centros activos del catalizador: Pequeña fracción de puntos en la superficie del catalizador, en donde se localiza en gran medida la actividad del catalizador.
Cianosis: Coloración azulada de la piel y mucosas debido a la falta de oxígeno.
Cilios: Proyecciones similares a cabellos, que se encuentran en los pulmones, los cuales extraen microbios y residuos de las vías respiratorias.
Colapso: Paulatina falta de riego al cerebro.
Conjuntiva: Membrana mucosa muy fina que cubre interiormente los párpados.
Edema: Implica el agrandamiento de órganos, piel u otras estructuras corporales, causado por la acumulación excesiva de líquidos en los tejidos.
Encefalopatía: Falta suministro de oxígeno al cerebro.
Epitelio: Capa generalmente múltiple, de células que cubre la superficie externa y algunas internas del cuerpo, como la piel, mucosas, los bronquios, intestinos, y forma las glándulas.
Fotofobia: Dolor ocular producido por la luz; sensibilidad a la luz solar.
Mercaptanos: Compuestos fuertemente olorosos de carbono, hidrógeno y azufre que se encuentran en el gas y en el aceite. Algunas veces se agregan al gas natural por razones de seguridad.
Molécula: Partícula más pequeña a la que un compuesto puede ser reducido sin perder su identidad química.
Neumonitis: Inflamación del pulmón.
Pilosidades: Vellosidades de la nariz; son barreras externas que impiden el paso de agentes extraños.
Proceso de recuperación de azufre: Proceso ecológico de conversión térmica y catalítica para recuperar el azufre del gas ácido, cuyo único fin es la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera.
Queratoconjuntivitis: Inflamación de la córnea y conjuntiva producida por la exposición a la radiación ultravioleta.
Selectividad catalítica: Cuando un determinado catalizador genera la formación de ciertos compuestos.
Tiempo de residencia: Tiempo considerado para que la reacción se lleve a cabo.
Umbral: Dosis ó concentración por debajo de la cual no se espera que aparezca ningún efecto.

Umbral odorífico: La concentración más baja de una sustancia olorosa que puede ser detectada por el hombre.
Vesículas del epitelio de la córnea: Aparición de vesículas (burbujas) en el epitelio de la córnea.