



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**ESTUDIO DE PERFIL TÉCNICO-ECONÓMICO PARA
DETERMINAR LA VIABILIDAD DE LA TECNOLOGÍA DE
SOLIDIFICACIÓN DE AZUFRE.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O Q U Í M I C O

P R E S E N T A :

PATRICIA ITZEL CARRASCO GARCIA

ASESOR M. EN I. EDUARDO MARTÍNEZ GARCÍA



CIUDAD DE MÉXICO

2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE	MTRO. GENARO ALTAMIRANO GARCIA
VOCAL	MTRO. EDUARDO MARTÍNEZ GARCÍA
SECRETARIO	DRA. ANA LILIA MALDONADO ARELLANO
1 ER. SUPLENTE	MTRO. VÍCTOR HUGO VILLAR MARÍN
2 DO. SUPLENTE	I.Q. CONSUELO MATIAS GARDUÑO

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:
INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO Y FES ZARAGOZA

ASESOR M. en I. EDUARDO MARTÍNEZ GARCÍA

SUSTENTANTE PATRICIA ITZEL CARRASCO GARCÍA

AGRADECIMIENTOS

*Hay personas que llegan a nuestras vidas y dejan
huellas en nuestros corazones y nunca volveremos
a ser los mismos.*
Amy Winehouse

*Las dificultades preparan a personas comunes
para destinos extraordinarios*
C.S. Lewis

Al destino

Porque hace que uno conozca nuevos horizontes y te enseña que no todo en la vida es lineal o constante.

A mis abuelitas:

Reyna Hernández

Por todo el amor, la fortaleza, el tiempo, las palabras, la sabiduría y el apoyo que me ha dado durante toda mi vida, sin usted no sería nada de lo que hoy en día soy. Estoy inmensamente agradecida por haber coincidido con usted y porque mis mejores recuerdos de infancia fueron a su lado.

Rosa Tolentino

Por todos esos momentos en los que me cuidaba, me daba un consejo y por los aprendizajes que he tenido al estar en su compañía.

A mis padres:

Guadalupe García y Antonio Carrasco

Primeramente, agradezco por darme la vida y la oportunidad de poder realizar una carrera profesional. También por estar en cada proceso de mi vida, por apoyarme incondicionalmente en cada fracaso, por motivarme a perseguir mis sueños, por secar cada una de mis lágrimas, por todo el trabajo que han realizado para hacer de mi un ser de bien.

A mis hermanos:

Daniel y Marco Carrasco

Por todas esas experiencias que nos han fortalecido, por el apoyo emocional y económico, por confiar y creer siempre en mí, por siempre animarme ante cualquier dificultad y por esa amistad que no encontraré en ningún otro lado.

A mi hermana:

Virginia Carrillo

Porque me has enseñado que cuando nadie cree en ti ello te da fortaleza para seguir y que los sueños se pueden lograr.

A mi director de tesis:

Eduardo Martínez

Por la inmensa paciencia que me tuvo, por todo el apoyo durante la realización de mi servicio social, prácticas profesionales y realización de esta tesis. Gracias también por los conocimientos transmitidos, por todas las correcciones y en especial por el tiempo que me brindo.

A cada uno de los sinodales:

Por el tiempo dedicado para la revisión de este trabajo, por su participación en el mismo y por sus conocimientos transmitidos durante mi preparación en la carrera.

A mi mejor amiga:

Brenda Acevedo

Por creer en mí, por siempre apoyarme en cada propósito que tengo, por ayudarme a levantarme ante mis fracasos, por siempre tener una palabra para motivarme, por tú amistad que durante catorce años ha sido incondicional y por ser esa hermana que siempre anhele tener.

A personas que hicieron especial esta experiencia:

Dario Palacios, Andrea Pioquinto, Alejandro Cano, Valeria Lozada, Alan Alfaro, Vanessa Delgado, Centli Garcia, Mario Martínez, Ruth Méndez, Salvador Garcia y Ulises Galicia

Cada uno de ustedes en diferentes momentos hicieron que esta experiencia fuera más liviana, les agradezco porque hicieron que adquiriera conocimientos académicos y experiencias de la vida. Gracias por todas esas palabras de motivación que en algún momento tuvieron, también agradezco por coincidir con cada uno de ustedes y aunque no todos seguirán en mi vida, siempre estarán en mis recuerdos.

A los profesores:

Javier Mandujano, Genaro Altamirano, Víctor Villar, Gilberto Bahena y Mario Martínez

Agradezco su contribución durante mi estancia en la universidad porque cada uno me enseñó a adquirir conocimientos de cuestiones tanto académicas como de la vida diaria de una manera tan única que ello marco en mí una especial forma de aprendizaje.

A los ingenieros:

Beatriz Anaya y Alberto Aguilar

Por la aportación y revisión que realizaron a este proyecto.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO I. OBJETIVO	11
CAPÍTULO II. ESTUDIO DE MERCADO	12
2.1. GENERALIDADES.....	12
2.2. PROPIEDADES.....	13
2.3. USOS.....	15
2.4. OBTENCIÓN.....	16
2.5. MERCADO INTERNO.....	17
2.5.1. OFERTA NACIONAL.....	18
2.5.1.1. PRODUCCIÓN DE PEMEX.....	20
2.5.1.2. PRODUCCIÓN POR ESTADO.....	21
2.5.1.3. IMPORTACIONES.....	24
2.5.2. DEMANDA NACIONAL.....	25
2.5.2.1. EXPORTACIONES.....	27
2.5.3. BALANCE OFERTA-DEMANDA DEL AZUFRE EN MÉXICO.....	28
2.6. PROYECCIONES DE MERCADO.....	30
2.6.1. PROYECCIÓN DE LA OFERTA NACIONAL.....	30
2.6.1.1. REFINERÍAS.....	32
2.6.1.2. CENTROS PROCESADORES DE GAS.....	35
2.6.2. PROYECCIÓN DE LA DEMANDA NACIONAL.....	35
2.6.3. PROYECCIÓN DEL BALANCE OFERTA-DEMANDA.....	37
2.7. PRECIOS DE AZUFRE.....	39
CAPÍTULO III. ESTUDIO TÉCNICO	46
3.1. TECNOLOGÍAS DE ENCAPSULADO Y GRANULADO DE AZUFRE.....	46
3.1.1. PROCESO DE ENCAPSULADO CON ROTOR Y CINTURÓN FRIO.....	47
3.1.2. PROCESO DE GRANULACIÓN CON AIRE DE ENFRIAMIENTO EN UNA TORRE.....	48

3.1.3. PROCESO DE GRANULACIÓN CON AGUA DE ENFRIAMIENTO	49
3.1.4. PROCESO DE GRANULADO POR ASPERSIÓN.....	50
3.1.5. PROCESO SLATE	51
3.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS Y PROVEEDORES	51
3.3. DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS TÉCNICOS DE CASO DE ESTUDIO	54
3.4. BASES DE DISEÑO.....	56
3.5. SELECCIÓN DE PROVEEDOR PARA CASO DE ESTUDIO	62
3.6. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO.....	63
3.7. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA (ENTRADAS Y SALIDAS)	64
3.8. PLANO DE LOCALIZACIÓN GENERAL PRELIMINAR.....	65
3.9. LISTA DE PREDIMENSIONAMIENTO DE EQUIPO, INSTALACIONES Y MATERIALES	68
3.9.1 PAQUETE DE ENCAPSULADO DE AZUFRE.....	68
3.9.2 BOMBAS	69
3.9.3 AEROENFRIADOR	70
3.9.4 TUBERÍAS	70
3.9.5 ALMACEN.....	71
3.9.6 MONTACARGAS	72
3.10. REQUERIMIENTOS DE SERVICIOS AUXILIARES	73
CAPÍTULO IV. ESTUDIO ECONÓMICO.....	75
4.1. ESTIMADO DE COSTO DE INVERSIÓN CLASE V.....	75
4.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA A NIVEL PERFIL	82
4.3. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL CASO DE ESTUDIO.....	90
CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS	107
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES	109
REFERENCIAS.....	111
GLOSARIO.....	114

INTRODUCCIÓN

La actual situación económica a nivel mundial demanda que para cualquier tipo de industria sean desarrollados los procedimientos específicos a fin de alinear la maximización de las utilidades del negocio con las dimensiones técnica, económica, ambiental y social, esto con el fin de lograr la sustentabilidad de la cadena de valor de un producto o servicio. Con miras en lo anterior, se hace fundamental centrar especial interés no sólo en la optimización de los productos principales, sino también en los subproductos que se obtienen en la mayoría de los procesos industriales, ya que estos, en algunos casos no son deseados, tanto por su bajo valor económico, así como por ser considerados como contaminantes o una combinación de los dos anteriores rubros.

En los Centros Procesadores de Gas, Refinerías y Complejos Petroquímicos, en las últimas décadas se ha incentivado el desarrollo de tecnologías amigables con el medio ambiente, fundamentadas en los acuerdos internacionales sobre cambio climático, en primera instancia siguiendo los acuerdos del Protocolo de Kioto ^[1] y actualmente orientándolos al Acuerdo de París ^[2], en ellos se hace hincapié en abatir las emisiones a la atmosfera significativamente y en este sentido se propició el idear las estrategias para desarrollar combustibles de ultra bajo azufre, lo que ha implicado en el constante desarrollo de nuevas tecnologías para lograr este fin, con lo cual a su vez se ha maximizado paulatinamente la producción de azufre en los diferentes complejos (considerado como subproducto), creando nuevos retos en cuanto a su recuperación, logística, almacenamiento y uso final.

Un cambio importante en 2020 es la implementación de una nueva norma internacional (IMO 2020), en donde se indica el abatir las emisiones de óxido de azufre de los buques, limitando el contenido global de azufre de los combustibles marinos al 0.5%, lo que probablemente conduzca a un aumento de producción en América del Norte, Asia y Europa. Por otro lado, también se espera que el incremento de la extracción de gas y petróleo crudo de mala calidad, junto con la producción de arenas bituminosas, lleven a una mayor producción de azufre. ^[3]

Ya sea derivado de fuente natural o como un subproducto de petróleo, gas o procesamiento químico, el azufre se produce en forma líquida a una temperatura entre 125-145 °C. La logística y manejo del azufre líquido sólo aplica si uno o más de los siguientes factores se presenta: distancias cortas de transporte, ciclos cortos de almacenamiento, disponibilidad de un sistema de almacenamiento adecuado y disponibilidad de infraestructura de transporte, ya sea por carretera, barco o ferrocarril, no obstante, cualquier producto fundido de esta naturaleza es difícil de manipular y costoso, por lo que comúnmente se transforma en un producto sólido más manejable. ^[4]

El almacenaje del azufre en fase sólida representa un riesgo debido a sus propiedades fisicoquímicas, por ejemplo: el polvo de azufre produce cargas estáticas, y esto puede provocar un incendio y explosión, adicionalmente cuando arde forma anhídrido sulfuroso, este es un gas peligroso en concentraciones de 400 ppm y superiores. ^[5]

De acuerdo a las problemáticas y riesgos ya mencionados en los párrafos anteriores, para facilitar el manejo, almacenamiento y transporte del azufre desde hace cuatro décadas se han desarrollado tecnologías para formar pastillas o gránulos semiesféricos de azufre.^[5] Existen cinco procesos que son utilizados para formar capsulas o gránulos semiesféricos de azufre¹, los cuales son: (1) proceso de encapsulado con rotor y cinturón frío, (2) proceso de granulación con aire de enfriamiento en una torre, (3) proceso de granulación con agua de enfriamiento, (4) proceso de granulado por aspersión y (5) proceso slate.^[6]

Actualmente las tecnologías más utilizadas a nivel mundial son la del proceso de encapsulado con rotor y cinturón frío, proceso de granulación con agua de enfriamiento y proceso de granulación por aspersión, esto debido a que tienen menos grado de humedad lo que para muchos compradores es importante debido a que cuando se manipula este elemento no genera demasiadas emisiones de polvo.

Las anteriores tecnologías tienen por objeto el evitar paros en la producción de petrolíferos por efecto de la obstrucción de las líneas de proceso debido a la acumulación del azufre líquido en las fosas de almacenamiento que se sitúan al final de los procesos de producción. Actualmente hay más de 700 instalaciones de encapsulado de azufre que operan en todo el mundo, sin embargo, en México su implementación es insipiente. ^[7]

El balance oferta-demanda de azufre al 2017 en México indica que existe un excedente del orden de 480 MTPA, el cual se prevé siga creciendo en el corto y mediano plazo, debido a que se han planeado y conceptualizado diversos proyectos como son: la construcción de la Refinería de Dos Bocas en Paraíso, Tabasco, la implementación de un tren de refinación en alguno de los Complejos Petroquímicos en Coatzacoalcos, Veracruz, y el apego a la normatividad internacional a fin de reducir las emisiones de azufre en combustibles marítimos.

¹ Azufre en fase líquida: presenta este estado a una temperatura entre 125-145 °C.

Azufre en fase sólida: azufre líquido que se deja enfriar a temperatura ambiente.

Azufre en gránulos: es de forma esférica y su tamaño de partícula es de 1 a 6 mm de diámetro.

Azufre encapsulado: es de forma hemisférica y su tamaño de partícula es de 3 a 6 mm de diámetro.

Por las razones antes ya mencionadas, se considera que la implementación de alguna de las tecnologías para encapsular o granular el azufre sería una estrategia indispensable e inaplazable para poder facilitar y aumentar su comercialización en México, a la vez que se propiciaría una mejora significativa para su almacenamiento, y así poder reducir el excedente que se tiene en los Centros Procesadores de Gas, Refinerías y Complejos Petroquímicos ya que el almacenamiento en estos lugares no es el idóneo, debido a que la mayoría de excedente de azufre se encuentra en los patios de azufre a la intemperie, lo cual en algún momento puede ocasionar un accidente.

El principal objetivo de la presente tesis es determinar si existe la viabilidad técnico-económica de la implementación de una tecnología de encapsulado o granulado de azufre en México a través de la realización de los análisis necesarios que conforman un estudio de perfil técnico económico de un proyecto de inversión, teniendo como Caso de Estudio su potencial implementación en la Refinería “Francisco I. Madero”, en Ciudad Madero, Tamaulipas.

Dentro de este marco, se desarrollaron en el presente proyecto los siguientes aspectos:

En el capítulo I se plantea el objetivo, el cual nos permiten conocer el alcance del proyecto y de esta manera el lector pueda tener una idea de la extensión de este.

En el capítulo II se caracteriza el producto (azufre) y se realiza el estudio de mercado con el fin de tener un panorama de las situaciones históricas, actuales y futuras del azufre en México en cuanto a oferta, demanda y precios y con ello poder conocer la oportunidad de mercado que tiene este producto y generar los insumos requeridos para realizar un análisis económico.

En el capítulo III se presentan las diferentes tecnologías de encapsulado y granulado de azufre y las características de cada una de ellas, con base a lo anterior se hace la selección de la mejor opción para el Caso de Estudio y se presenta los requerimientos técnicos, base de diseño, diagrama de bloques, balance de materia y energía, requerimiento de servicios auxiliares, pre-dimensionamiento de equipos de proceso e infraestructura y Plano de Localización General de equipo que requerirá el Caso de Estudio.

En el capítulo IV se desarrolla el estudio económico, el cual incluye. 1) la determinación de un Estimado de Costo de Inversión Clase V, 2) la formulación del proyecto de inversión, y 3) la corrida económica para determinar indicadores económicos que constante la viabilidad técnica económica de la implementación de la tecnología de encapsulado de azufre y 4) la elaboración de los análisis de sensibilidad correspondientes.

En el capítulo V se muestra el análisis de los resultados que se obtuvieron en los capítulos II, III y IV.

En el capítulo VI se presentan las conclusiones del trabajo y se hacen algunas recomendaciones.

CAPÍTULO I. OBJETIVO

Determinar la viabilidad técnico- económica para implementar la tecnología de “solidificación”² de azufre en la Refinería “Francisco I. Madero”, en Ciudad Madero, Tamaulipas. Lo anterior se fundamentará en lo siguiente:

- Desarrollar un estudio de mercado del azufre en México al año 2017 con la finalidad de determinar la oferta, la demanda, así como los precios de mercado y la prospectiva de los anteriores rubros en un horizonte de 8 años.
- Identificar las tecnologías comerciales para el encapsulado o granulado de azufre detectando sus ventajas y desventajas con miras a realizar una selección de tecnología.
- Desarrollar un estudio técnico conceptual con él fin de determinar los requerimientos de infraestructura necesaria para la operación de una Planta de “encapsulado o granulado” de azufre (Caso de Estudio).
- Formular el proyecto de inversión a fin de identificar los costos y beneficios por la implementación del proyecto de inversión.
- Desarrollar un Estimado de Costo de Inversión Clase V y una evaluación económica a nivel perfil para el Caso de Estudio.

² El término correcto es encapsulado o granulado de acuerdo con lo siguiente:

Azufre en fase sólida: azufre líquido que se deja enfriar a temperatura ambiente.

Azufre en gránulos: es de forma esférica y su tamaño de partícula es de 1 a 6 mm de diámetro.

Azufre encapsulado: es de forma hemisférica y su tamaño de partícula es de 3 a 6 mm de diámetro.

Por lo tanto, en lo subsiguiente el Caso de Estudio hará referencia a las tecnologías de encapsulado o granulado de Azufre

CAPÍTULO II. ESTUDIO DE MERCADO

2.1. GENERALIDADES

El azufre es un elemento no metálico y sólido a temperatura ambiente, de color amarillo. Existe puro, de acuerdo con su estructura molecular, es el decimotercer elemento más abundante en la corteza terrestre.^[8]

El azufre alfa también llamado azufre rómbico, es una modificación estable por debajo de los 95.5 °C este es de color amarillo limón, quebradizo y cristalino. Es insoluble en agua, ligeramente soluble en alcohol etílico, éter dietílico y benceno, y es muy soluble en disulfuro de carbono. Su densidad es 2.07 g/cm³ y su dureza es de 2.5 en la escala de Mohs.

Azufre beta también conocido como azufre monoclinico, es estable únicamente entre 95.8 y 118.8 °C. Si se deja el azufre monoclinico a temperatura ambiente se convierte lentamente en azufre rómbico.

El azufre gamma se produce cuando el azufre es fundido en el punto de ebullición o cerca de él y es enfriado al estado sólido. Esta forma es amorfa y es parcialmente soluble en disulfuro de carbono.

El azufre gaseoso presenta un color amarillo naranja y cuando la temperatura aumenta (aproximadamente a 650 °C) se torna color rojo, posteriormente se aclara y adquiere un color amarillo pálido.

El azufre líquido tiene la propiedad notable de aumentar su viscosidad si se aumenta la temperatura. Su color cambia a rojizo oscuro cuando su viscosidad aumenta, y el oscurecimiento del color y la viscosidad logran su máximo a 200 °C.^[9]

En la naturaleza el azufre existe en estado libre en yacimientos y combinado en minerales como la pirita (FeS₂), la esfalerita (ZnS) y la calcopirita (CuFeS₂). Actualmente la mayoría del azufre es obtenido como un subproducto recuperado de la producción de petróleo y gas, es un constituyente importante del petróleo y del gas natural como ácido sulfhídrico.

El azufre se puede combinar con otros elementos para formar diversos compuestos. Los compuestos de azufre, como el ácido sulfúrico, también se producen como un subproducto de la fundición de metales ferrosos y no ferrosos.^[8]

En México es obtenido o producido por PEMEX en Centros Procesadores de Gas, Refinerías y Complejos Petroquímicos por recuperación. El azufre se maneja sólido a temperatura ambiente y líquido a temperatura promedio de 120°C.

2.2. PROPIEDADES

Algunas de las propiedades del azufre se mencionan a continuación:

- Se combina directamente con la mayoría de los elementos para formar sulfuros, en algunos casos mediante calor o de algún catalizador.
- Se une a todos los metales, con excepción del oro y el platino. En el aire húmedo se oxida lentamente, transformándose en ácido sulfúrico y en sulfuroso.
- El azufre arde en el aire o en oxígeno formando SO_2 e indicios de SO_3 .
- Este elemento es mal conductor del calor. Se funde, dando un líquido amarillo pálido, que por calentamiento prolongado se oscurece y espesa, adquiriendo un color casi negro a 235°C . A temperaturas más elevadas, se vuelve otra vez menos viscoso y, finalmente, hierve a 445°C .
- Es insoluble en agua; soluble en diferente grado, en muchos solventes orgánicos tales como el sulfuro de carbono, benceno, anilina caliente, tetracloruro de carbono caliente y amoniaco líquido. El sulfuro de carbono es el solvente más empleado.
- Las mezclas de azufre y clorato de potasio o de azufre y polvo de zinc, son altamente explosivas.
- El azufre por sí sólo no es corrosivo para los materiales usuales de construcción. El azufre seco y fundido se maneja satisfactoriamente en equipo de acero o de hierro fundido. Sin embargo, las impurezas generadoras de ácidos que son introducidas en el manejo y el almacenaje crean condiciones corrosivas.
- Es relativamente tóxico, puede irritar la conjuntiva ocular y la mucosa de los conductos respiratorios. El azufre en polvo en ocasiones produce irritación en la piel. El azufre elemental, por ingestión o por contacto externo con el cuerpo, puede formar ácido sulfhídrico y otros compuestos sulfurados.
- Cuando arde forma anhídrido sulfuroso, gas peligroso en concentraciones de 400 ppm y superiores. Para exposición de media hora a una hora, la máxima concentración tolerable de este gas es de 50 a 100 ppm.
- Debido a la tendencia del polvo de azufre a producir cargas estáticas, presenta riesgo de incendio y explosión. Cuando se pulveriza se recomienda tener una atmósfera inerte para evitar explosiones. ^[10]

TABLA 2.1
HOJA DE ESPECIFICACIONES DATOS GENERALES

NOMBRE COMÚN	AZUFRE
NOMBRE QUÍMICO	AZUFRE
OTROS NOMBRES	AZUFRE ELEMENTAL
FÓRMULA CONDENSADA	S
PESO MOLECULAR	32.064

Fuente: <http://www.lenntech.com/espanol/tabla-peiodica/S.htm>

TABLA 2.2
PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS

ESTADO FÍSICO	SÓLIDO QUEBRADIZO
COLOR	AMARILLO
OLOR	SIN OLOR CUANDO ES PURO
TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN	190°C
TEMPERATURA DE INFLAMABILIDAD	188°C
TEMPERATURA DE EBULLICIÓN	445°C
TEMPERATURA DE FUSIÓN	119°C
CORROSIÓN	ATACA RÁPIDAMENTE AL ACERO
ÍNDICE DE REFRACCIÓN	1.957
EN AGUA	INSOLUBLE
EN ALCOHOL, ÉTER	LIGERAMENTE SOLUBLE
EN DISULFURO DE CARBONO Y TETRACLORURO DE CARBONO	SOLUBLE
CONTACTO CON LA PIEL	EN FORMA DE POLVO CAUSA IRRITACIÓN
INHALACIÓN	IRRITANTE
INGESTIÓN	EN DOSIS >10 G CAUSA INTOXICACIÓN

Fuente: http://www.educaplus.org/sp2002/4propiedades/4_16.html

TABLA. 2.3
INFORMACIÓN DE SEGURIDAD DEL AZUFRE

RECIPIENTES PARA ALMACENAMIENTO.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ PARA AZUFRE LÍQUIDO: EN TERMOTANQUES. ▪ PARA AZUFRE SÓLIDO: SACOS, A GRANEL EN BARCOS Y FERROCARRILES.
RIESGOS PRINCIPALES
<ul style="list-style-type: none"> ▪ DIVIDIDO PUEDE CAUSAR INCENDIO Y EXPLOSIÓN. ▪ LÍMITE MÍNIMO DE EXPLOSIVIDAD: 30 ppm.

Fuente: http://www.educaplus.org/sp2002/4propiedades/4_16.html

2.3. USOS

Más del 90% de la producción de azufre es utilizada para procesar ácido sulfúrico y más del 50% de ácido sulfúrico es consumido para la producción de ácido fosfórico, este último es utilizado como fertilizante. La otra proporción del ácido sulfúrico es aplicada para la manufactura de otros fertilizantes no fosfatados, producción de óxido de titanio, producción ácido fluorhídrico, alquilación de ácido sulfúrico, manufactura textil y producción de acero. Otro uso significativo del ácido sulfúrico es en la minería para remover las impurezas del mineral.

Debido a que el azufre tiene una gran variedad de reacciones de síntesis orgánica y a que se combina con casi todos los elementos, se le ha considerado un indicador confiable del desarrollo de un país. Por lo cual, mientras más consumo de azufre tenga una nación, más desarrollada industrialmente se encontrará. En el año 2018 China fue el mayor consumidor de azufre seguido de Estados Unidos mientras que México ocupó el onceavo lugar. ^[11]

El azufre en grandes cantidades se utiliza en:

- Artículos de caucho
- Insecticidas
- Cementos
- Aislantes eléctricos
- Manufactura de pólvora y fósforos
- Productos farmacéuticos, medicinales para la piel

Los compuestos de azufre se emplean en:

- Productos químicos
- Textiles
- Jabones
- Pieles
- Plásticos
- Refrigerantes
- Agentes blanqueadores
- Tintes
- Pinturas
- Manufactura de papel
- Ácido sulfúrico
- Disulfuro de carbono
- Fertilizantes artificiales
- Explosivos
- Fungicidas

2.4. OBTENCIÓN

Muchos de los depósitos importantes están asociados con caliza, yeso y anhidrita; frecuentemente ocurre que hay materia carbonácea en forma de petróleo o de betún en la roca que contiene el azufre o en las formaciones asociadas.

El azufre es el decimotercer elemento más abundante en el universo y ocupa el quinto lugar en abundancia entre los elementos en la corteza de nuestro planeta, encontrándose ampliamente distribuido tanto libre como combinado.

En nuestro planeta se hallan depósitos de azufre en regiones de actividad volcánica, originados por los gases y vapores emitidos por los cráteres activos y las fuentes termales. Estos gases y vapores depositan azufre en las fracturas de las rocas o en los sedimentos de los lagos o por reemplazo en la roca misma. Los minerales comunes asociados son la pirita, la marcasita y otros sulfuros, sulfatos y minerales silíceos hidratados, como el ópalo.

A fines de la década de 1890, Herman Frasch desarrolló un ingenioso método de obtención, el cual consiste en fundir el azufre bajo tierra o bajo el lecho de mar, y luego bombearlo hasta la superficie. Se utiliza equipo común de los pozos petroleros para hacer las perforaciones hasta el fondo de los estratos cargados de azufre, a una profundidad de entre 150 y 750 metros. Se introduce un juego de tres tubos concéntricos, cuyos diámetros de 3, 10 y 20 cm, a través del estrato que contiene el azufre y se mantiene en la porción de la anhidrita estéril. Se pasa un tubo de 10 cm a través del de 20cm, de modo que quede un espacio anular entre los dos, extendiéndose casi hasta el fondo de la roca cargada de azufre, y se le apoya un collar que sella el espacio anular entre los tubos de 20 y 10 cm. Un tubo para aire, de 3 cm de diámetro, dentro de los otros llega hasta una profundidad ligeramente por encima del collar mencionado.

Para la operación del pozo, se pasa agua caliente a 160°C hacia abajo del espacio anular, entre los tubos de 20 y 10 cm. Se descarga de la formación porosa cerca del pie del pozo. La roca cargada de azufre que está alrededor del pozo, a través de la cual circula el agua, es llevada a una temperatura por encima del punto de fusión del azufre. El azufre fundido, por ser más pesado que el agua, se hunde y forma una piscina alrededor de la base del pozo, en donde entra a través de la parte inferior y se eleva por el espacio que hay entre los tubos de 10 y 3 cm. Se hace entrar aire comprimido hacia abajo del tubo de 3 cm para aerear y reducir la densidad del azufre líquido para que pueda subir a la superficie.

Hoy en día, el azufre se produce como un subproducto de otros procesos industriales, como en el refinado de petróleo o en la obtención de gas natural, en el que el azufre no es deseable. ^[12]

2.5. MERCADO INTERNO

A nivel mundial la producción de azufre está clasificada en cuatro tipos:

1. Azufre elemental (nativo y/o fresco)
2. Azufre recuperado de gas natural y petróleo
3. Otras Formas de Azufre, OFA (ácido sulfúrico) de los procesos de fundición de metales
4. Piritas (ácido sulfúrico) ^[13]

Durante 2017 en México, las formas de producción de azufre fueron a través de los tipos dos y tres, el 53% de azufre producido es mediante la recuperación del gas natural y del petróleo en instalaciones de PEMEX y el 47% restante es obtenido mediante OFA. Al igual que el tipo uno de producción de azufre, en México no se tiene o no es significativa la producción de azufre vía piritas.

La producción de azufre elemental (tipo uno), es decir a través de la extracción minera, ha representado un mínimo porcentaje de la producción nacional total de este mineral, pues de acuerdo con la información disponible, es hasta el año de 1993 cuando existía producción por este medio. En el estado de Veracruz se registraba la actividad minera de azufre, específicamente en el municipio de Texistepec, ubicado en la zona sureste del estado, siendo la actividad predominante de esa localidad. Sin embargo, la producción de este mineral cayó a niveles tan bajos, que se dejó de contabilizar. ^[14]

En la primera sección de este capítulo se realiza el análisis de la oferta nacional de azufre, en el cual se presenta la producción histórica nacional de azufre más las importaciones de este mineral a nuestro país.

En la segunda sección se muestra la demanda nacional, la cual es la suma del consumo nacional de azufre más las exportaciones totales. En esta misma sección se presentan los datos históricos del consumo nacional de azufre, la cual está conformada por un 53% por las ventas internas de PEMEX y el 47% restante por el autoconsumo de OFA para la producción de ácido sulfúrico.

Más adelante se muestra el balance oferta-demanda con el fin de determinar la situación del mercado del azufre en México en 2017.

Posteriormente, en función de los datos históricos se realiza la proyección de la oferta, demanda y balance oferta- demanda del azufre nacional en el periodo 2018-2025. El periodo de proyección se seleccionó de tal manera que considere la implementación de los proyectos “Recuperación de la capacidad de procesamiento de crudo en el SNR”, “Refinería Dos Bocas Paraíso” y “Nuevo tren de Refinación en alguno de los Complejos Petroquímicos en Coatzacoalcos, Veracruz.

En la última sección de este capítulo se muestran los precios del azufre encapsulado y/o granulado de los mercados de referencia y los precios promedio de las ventas externas de azufre líquido de Estados Unidos y México en el periodo 2010-2017.

2.5.1. OFERTA NACIONAL

La oferta nacional de azufre está compuesta por la producción de PEMEX mediante la recuperación de azufre elemental del gas natural y del petróleo más la producción de azufre vía Otras Formas de Azufre (OFA), la cual se obtiene mediante el proceso de fundición de metales más las importaciones.

En la tabla 2.4 se muestran los datos históricos de estos tres conceptos, correspondientes al periodo de 2005 a 2017.

TABLA 2.4
OFERTA NACIONAL DE AZUFRE (MTPA)

CONCEPTO	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
PRODUCCIÓN PEMEX	1,029	1,077	1,030	1,041	1,114	992	959	1,011	1,029	962	858	673	551
OTRAS FORMAS DE AZUFRE (OFA)	688	697	740	699	586	818	701	729	781	878	552	487	487
IMPORTACIONES (IMPR)	26	70	104	374	356	349	417	419	422	375	408	420	444
TOTAL	1,743	1,844	1,874	2,114	2,056	2,159	2,077	2,159	2,232	2,215	1,818	1,580	1,482

Fuente: Anuario estadístico de labores de PEMEX (2005-2018)

Anuario Estadístico de la Minería Mexicana (2005-2017)

U.S. Geological Survey (2005-2019)

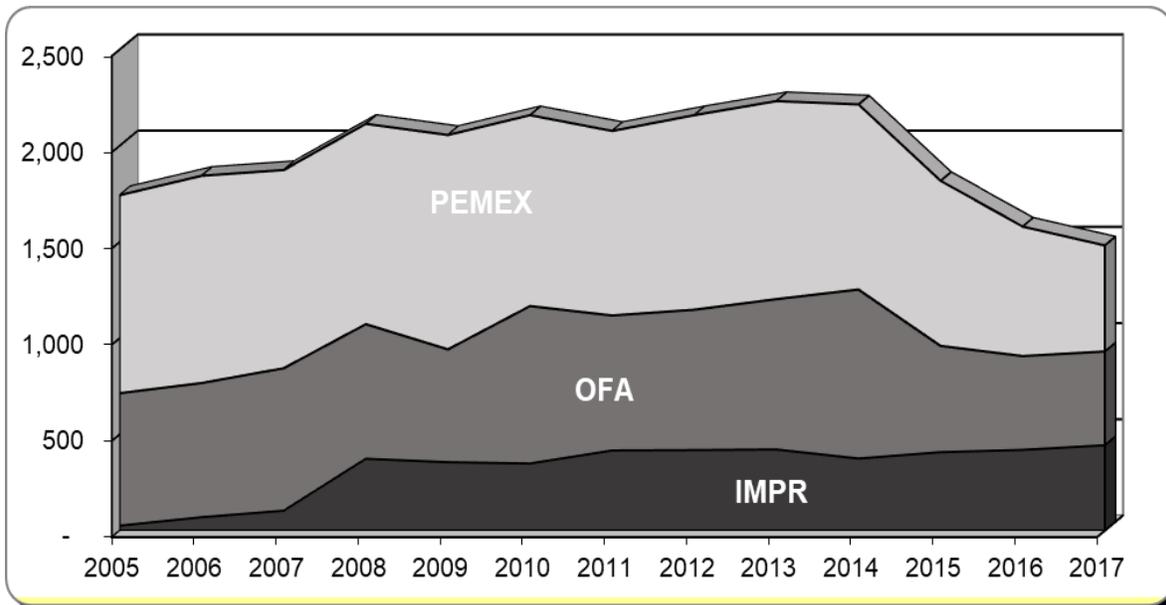
En la tabla se observa que las producciones de PEMEX se mantuvieron estables en el periodo de 2005 a 2013, posteriormente a este periodo la producción disminuyó, esto se debe a una reducción en la producción de petrolíferos en las Refinerías y una menor ocupación en los Centros Procesadores de Gas.

En el caso de OFA hubo un incremento de su producción en el periodo de 2005 a 2014 a una Tasa de Crecimiento Media Anual (TCMA) de 2.75%, mientras que las importaciones aumentaron considerablemente de 26 MTPA en el 2005 a 444 MTPA en el año 2017 con una TCMA de 26.68%, lo cual se debió principalmente a compensar la disminución en la producción de PEMEX.

La variación de la oferta nacional es mínima entre el 2005 y 2013, la TCMA en este periodo fue de 3.14%, posterior a este periodo hubo una disminución en la oferta. Así mismo, es importante indicar que la mayor oferta nacional de azufre se tuvo en el año 2013 con 2,232 MTPA.

La gráfica 2.1 corresponde a la oferta nacional de azufre, en la cual se observa que la producción de PEMEX fue mayor que la producción de Otras Formas de Azufre en un 49% en promedio, en el periodo 2005-2017.

GRAFICA 2.1
OFERTA NACIONAL DE AZUFRE (MTPA)



Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que las estadísticas de la producción vía OFA, son escasas en fuentes nacionales de información, por lo que se recurrió a publicaciones internacionales (*U.S. Geological Survey 2005-2019, Canadian Minerals Yearbook, 2017 y British Sulphur Report 2017*) en donde se reportan estos datos y se encontró semejanza entre los mismos, así como de la tendencia nacional de la producción de OFA.

La estadística de la producción de azufre elemental por PEMEX y las importaciones de azufre se muestran en la siguiente sección.

2.5.1.1. PRODUCCIÓN DE PEMEX

La Empresa Productiva Subsidiaria (EPS) de PEMEX que producen azufre elemental mediante la recuperación del gas natural y del petróleo es PEMEX Transformación Industrial, a través de nueve Centros Procesadores de Gas (CPG) y seis Refinerías (REF).^[6]

En la tabla 2.5 se observa que la producción en las REF se mantuvo constante en el periodo 2005-2013, subsecuente a este periodo se puede observar una disminución en la producción, mientras que para CPG se mantuvo constante en el periodo 2005-2014 y en los años posteriores a este periodo también disminuyó su producción.

TABLA 2.5
PRODUCCIÓN DE AZUFRE EN PEMEX (MTPA)

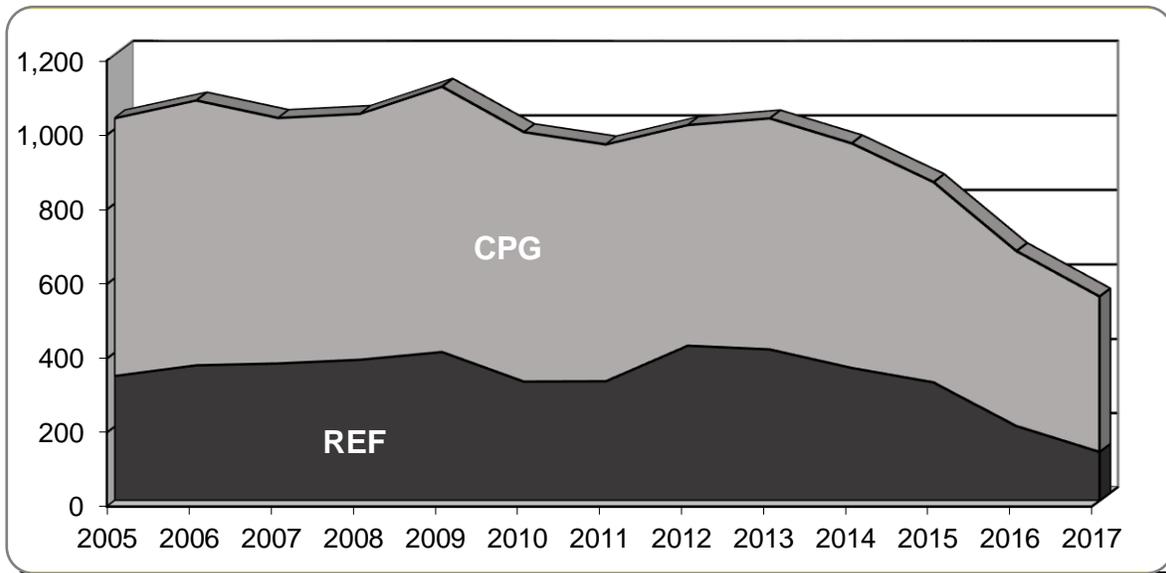
EPS	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
CPG	692	711	659	660	712	670	636	592	620	603	538	471	419
REF	337	366	371	381	402	322	323	419	409	359	320	202	132
TOTAL	1,029	1,077	1,030	1,041	1,114	992	959	1,011	1,029	962	858	673	551

Fuente: Anuario estadístico de labores de PEMEX (2005-2018)

En años recientes el número de paros no programados en las refinerías ha ido en aumento. El proceso de refinación de crudo en las refinerías del Sistema Nacional de Refinación (SNR) en el periodo 2009-2017 ha ido en disminución. Después de haber alcanzado el máximo de periodo en 2009, el proceso de crudo en el SNR ha venido a la baja, esta situación ha sido más evidente desde 2014, y reflejándose por ende en la producción de azufre.

En la gráfica 2.2, se aprecia que, de la producción total de azufre en PEMEX, el 24% se produce en las REF, mientras que el 76% restante se produce en los CPG.

GRAFICA 2.2
PRODUCCIÓN DE AZUFRE EN PEMEX (MTPA)



Fuente: Elaboración propia

2.5.1.2. PRODUCCIÓN POR ESTADO

En la tabla 2.6 se presenta la producción de azufre por estado (información recopilada en las Estadísticas Económicas de INEGI y en el Anuario Estadístico de la Minería Mexicana).

Los estados donde hubo mayor producción de azufre fueron Tabasco y Chiapas en donde se encuentran los Centros Procesadores de Gas La Venta y Cactus, respectivamente.

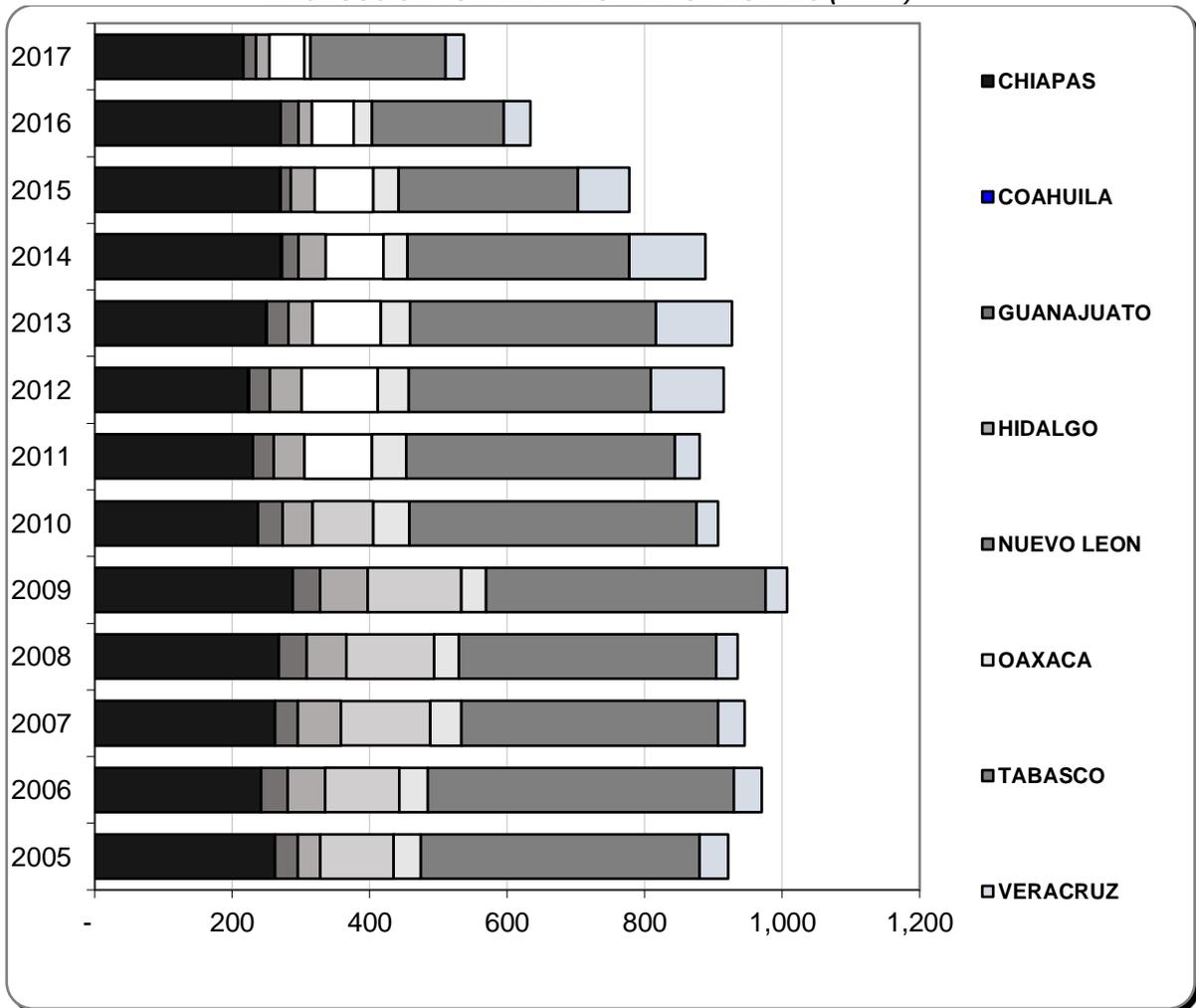
TABLA 2.6
PRODUCCION TOTAL DE AZUFRE POR ESTADO (MTPA)

ESTADOS	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
CHIAPAS	262	242	262	268	288	237	230	223	249	271	270	271	216
COAHUILA								1	1	1	1		
GUANAJUATO	33	39	33	40	40	36	30	31	32	24	14	25	19
HIDALGO	33	54	63	58	69	44	45	46	35	40	35	20	19
NUEVO LEON	107	108	130	128	136	88	98	111	99	84	85	61	51
OAXACA	39	41	45	36	36	53	50	45	43	35	37	26	9
TABASCO	406	446	374	374	407	417	391	352	357	323	261	192	196
TAMAULIPAS	99	107	86	105	107	84	80	97	102	104	80	40	15
VERACRUZ	41	40	38	31	31	32	36	106	111	110	75	39	27
TOTAL	1,020	1,077	1,031	1,040	1,114	991	960	1,012	1,029	992	858	674	552

Fuente: INEGI. Estadística de la Industria Minerometalúrgica 2017
Anuario Estadístico de la Minería Mexicana (2005-2017)

En la gráfica 2.3 se aprecia lo anterior, así como la disminución que hubo durante el periodo 2014 al 2017, el año donde hubo la mayor producción de azufre fue en 2009 con 1,114 MTPA.

GRAFICA 2.3
PRODUCCIÓN TOTAL DE AZUFRE POR ESTADO (MTPA)



Fuente: Elaboración propia

2.5.1.3. IMPORTACIONES

La mayor cantidad de importaciones de azufre en el país fueron registradas en los años 2016 y 2017, con 420 y 444 MTPA respectivamente, y corresponden a Canadá y Estados Unidos de América. Los países de los cuales se importó azufre se muestran en la tabla 2.7.

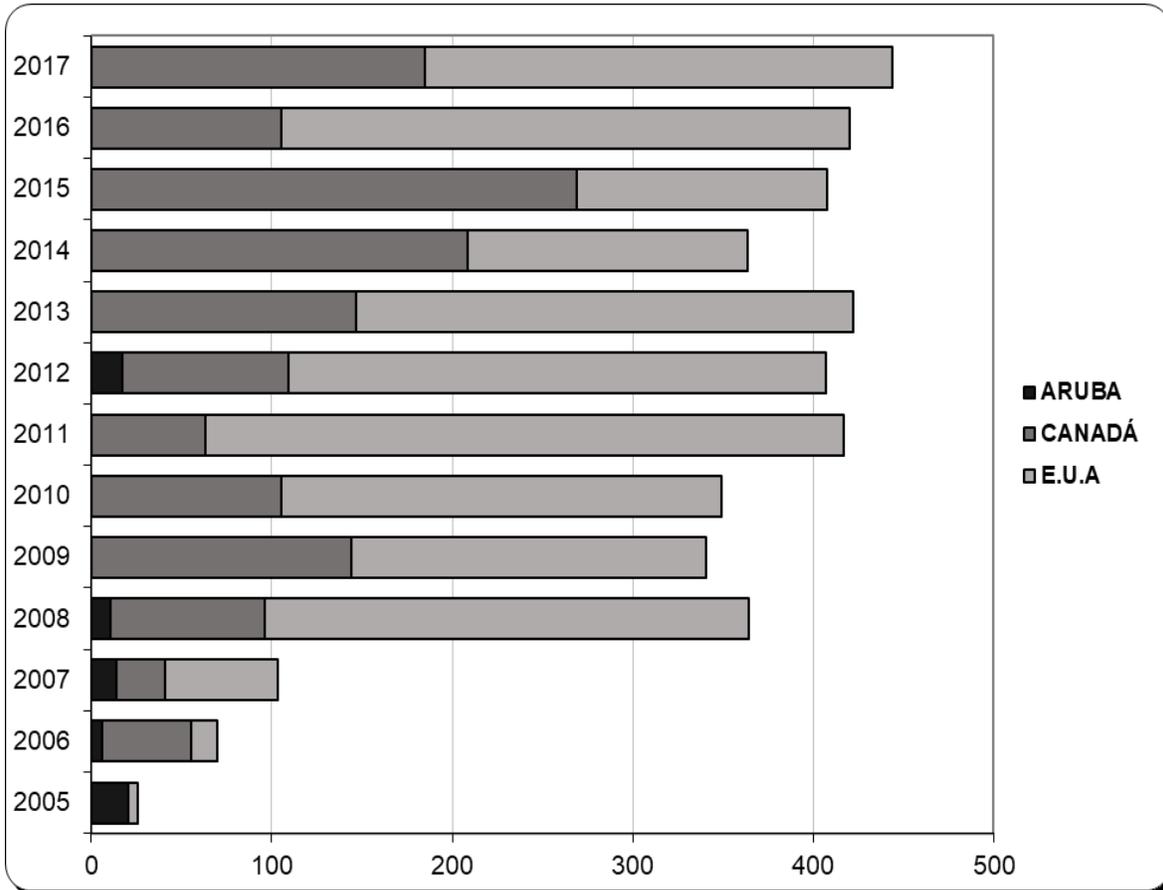
TABLA 2.7
IMPORTACIONES DE AZUFRE (MTPA)

PAIS	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
ARUBA	20	6	14	10				17					
CANADÁ		49	27	86	144	105	63	92	147	208	269	105	185
E.U. A	6	15	63	268	196	244	354	298	275	155	139	315	259
POLONIA								12					
SIRIA				10									
VENEZUELA					14					12			
TOTAL	26	70	104	374	356	349	417	419	422	375	408	420	444

Fuente: Anuario Estadístico de la Minería Mexicana (2005-2017)

En la gráfica 2.4 se puede apreciar que en los últimos años han aumentado considerablemente las importaciones de azufre en el país, y adicionalmente se observa que los mayores exportadores han sido Estados Unidos de América y Canadá.

GRAFICA 2.4
IMPORTACIONES DE AZUFRE (MTPA)



Fuente: Elaboración propia

2.5.2. DEMANDA NACIONAL

La demanda nacional de azufre está representada por la suma de las ventas internas, el autoconsumo de OFA y las exportaciones efectuadas en cada período, la cual promedia 1,492 MTPA para el periodo 2005-2017.

En la tabla 2.8 se observa que las ventas internas de PEMEX crecieron anualmente a una Tasa de Crecimiento Media Anual (TCMA) de 1.92% durante el periodo 2005-2014, posteriormente a este periodo hubo un descenso en sus ventas y el autoconsumo de las Otras Formas de Azufre han permanecido constantes durante el periodo 2005-2014. Referente al volumen de exportaciones, se mantuvieron del 2005 al 2013 en un rango de niveles de 500 mil toneladas anuales, reportando una baja en el periodo 2014 al 2017.

La producción total de azufre elemental recuperado del gas natural y del petróleo por PEMEX (ver sección 2.5.1.1.) es comercializada como ventas internas y las exportaciones en una proporción de 97% y 3% respectivamente. En cuanto a las OFA prácticamente se tiene un autoconsumo de la producción de azufre mediante esta vía de producción.

TABLA 2.8
DEMANDA NACIONAL DE AZUFRE (MTPA)

CONCEPTO	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
PEMEX	552	580	579	668	593	582	648	649	521	655	573	580	530
OFA	603	520	512	448	556	575	619	642	742	630	465	405	457
EXPORTACIONES (EXPR)	459	462	439	367	522	414	269	358	505	325	295	88	15
TOTAL	1,614	1,562	1,530	1,483	1,671	1,571	1,536	1,649	1,768	1,610	1,333	1,073	1,002

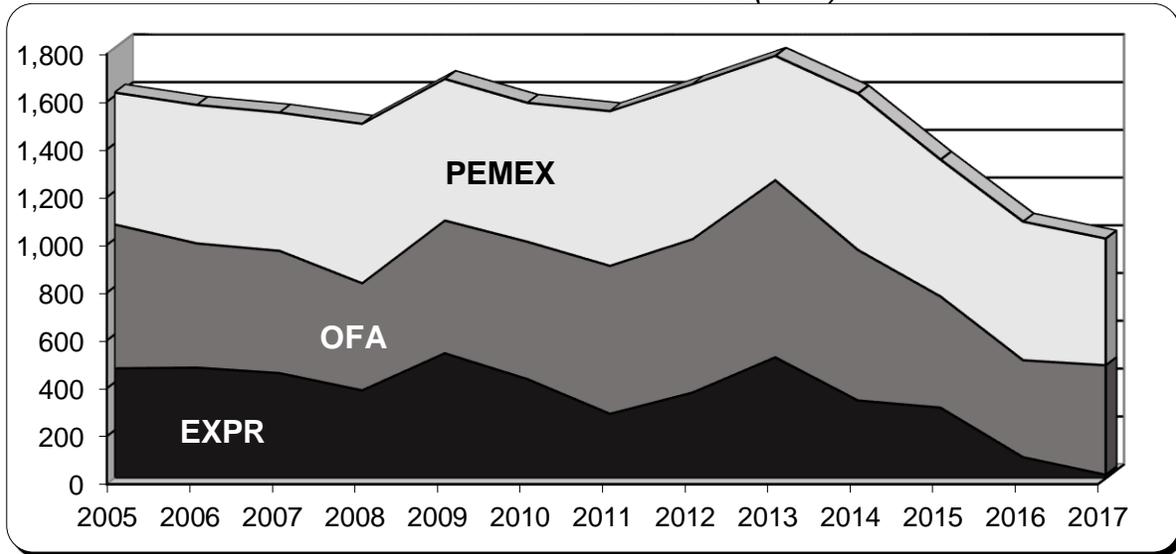
Fuente: Anuario estadístico de labores de PEMEX (2005-2018)
Anuario Estadístico de la Minería Mexicana (2005-2017)
British Sulphur Report 2017)
Anuario Estadístico de Comercio Exterior (2005-2017)

En la gráfica 2.5, se cuantifica la demanda nacional de azufre en los tres conceptos que la integran, indicando que las ventas internas de azufre componen el 78% de la demanda y las exportaciones ascienden a 22%. Del 78% de ventas internas totales, el 37% corresponde a ventas internas en OFA y el 41% a ventas internas de PEMEX.

Cabe aclarar, que al igual que las estadísticas de la producción de OFA, las estadísticas de consumo de la OFA son escasas en fuentes nacionales de información, por lo que se recurrió a publicaciones internacionales (*U.S. Geological Survey 2005-2019, Canadian Minerals Yearbook, 2017 y British Sulphur Report 2017*) en donde se reportan estos datos y se encontró una gran semejanza entre los datos y la tendencia nacional del consumo de OFA.

La estadística de las exportaciones de azufre se muestra en la siguiente sección.

GRAFICA 2.5
DEMANDA NACIONAL DE AZUFRE (MTPA)



Fuente: Elaboración propia

2.5.2.1. EXPORTACIONES

El promedio de las exportaciones de azufre del país en el periodo 2005-2017 fue de 348 MTPA, de los cuales el 99% fueron para los Estados Unidos de América. Las exportaciones para los países de Cuba y Canadá fueron mínimas, registrando el restante 1% del total.

En la tabla 2.9 se muestran las exportaciones a cada uno de los países mencionados.

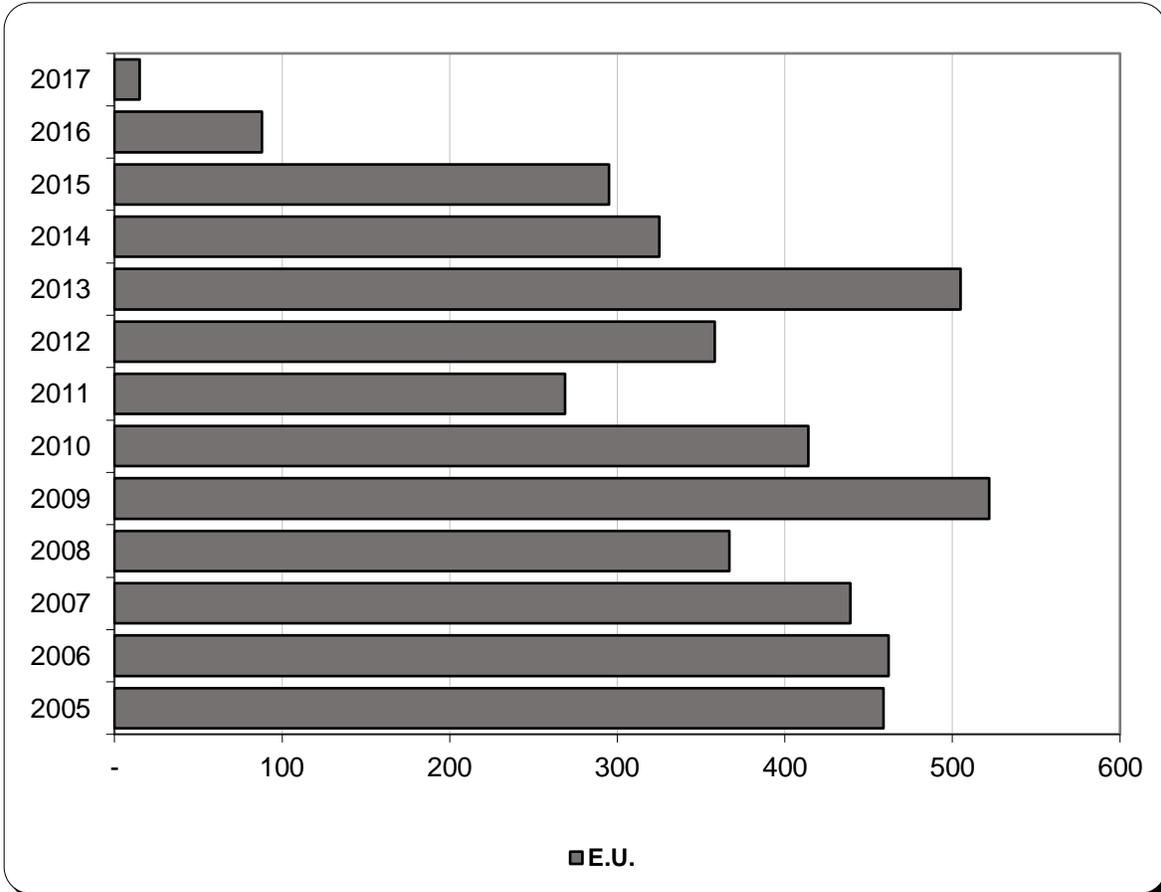
TABLA 2.9
EXPORTACIONES DE AZUFRE (MTPA)

PAIS	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
CANADÁ										0.08			
CUBA			0.08								0.02		
E.U.A.	459	462	439	367	522	414	269	358	505	325	295	88	15
TOTAL	459	462	439	367	522	414	269	358	505	325	295	88	15

Fuente: Anuario Estadístico de la Minería Mexicana (2005-2017)

En la gráfica 2.6 se observa que las exportaciones a Estados Unidos fueron casi constantes, a excepción de 2016 y 2017, donde hubo una disminución de un 99% con respecto al promedio del periodo 2005-2017.

GRAFICA 2.6
EXPORTACIONES DE AZUFRE (MTPA)



Fuente: Elaboración propia

2.5.3. BALANCE OFERTA-DEMANDA DEL AZUFRE EN MÉXICO

Se realiza un balance oferta-demanda para determinar la situación del mercado del azufre en nuestro país. Se puede apreciar que durante el período de 2005-2017, la producción y las existencias de azufre han sido suficientes para cubrir la demanda interna de este mineral en México e incluso hay un excedente de este, el cual se podría exportar.

En la tabla 2.10 se muestra cual ha sido el comportamiento de la oferta y la demanda, así como las diferencias en cada uno de los períodos, observándose excedentes en todo el periodo. Se tiene una TCMA de 18.73% en el periodo 2005-2014.

TABLA 2.10
BALANCE OFERTA-DEMANDA INTERNA DE AZUFRE (MTPA)

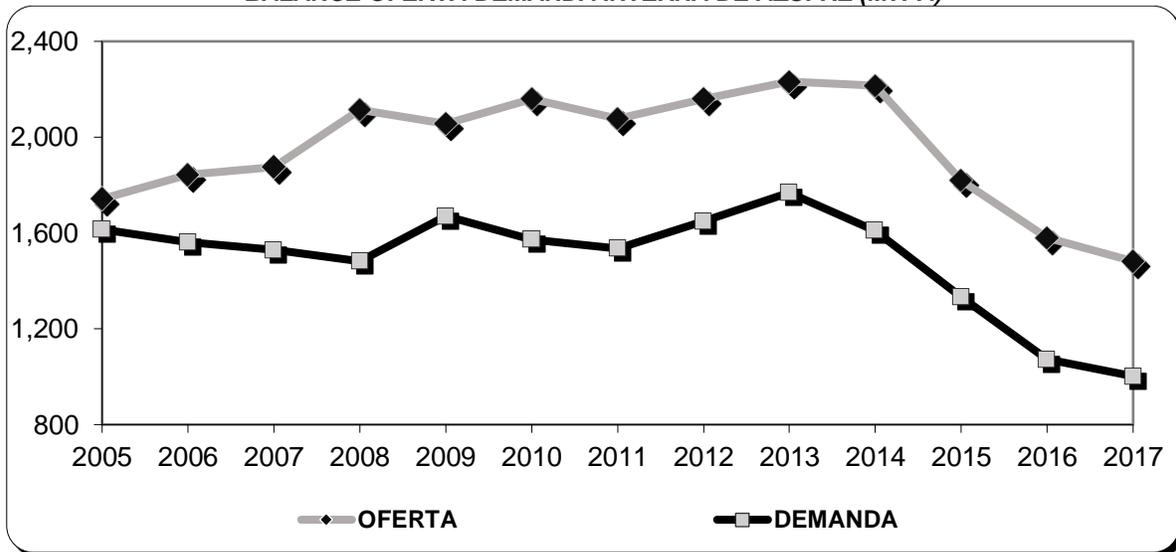
CONCEPTO	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
OFERTA	1,743	1,844	1,874	2,114	2,056	2,159	2,077	2,159	2,232	2,215	1,818	1,580	1,482
DEMANDA	1,614	1,562	1,530	1,483	1,671	1,571	1,536	1,649	1,768	1,610	1,333	1,073	1,002
TOTAL	129	282	344	631	385	588	541	510	464	605	485	507	480

Fuente: Elaboración propia

Dimensionando visualmente este balance, en la gráfica 2.7 se muestra el comportamiento de la oferta y la demanda, observándose que la oferta siempre ha sido mayor que la demanda, obteniéndose un excedente de 480 MTPA en el 2017.

Se debe reflexionar sobre el excedente actual de azufre en el país ya que este es un problema debido a sus propiedades fisicoquímicas, esto conlleva a tener problemas en los sitios de almacenamiento en cuestiones de seguridad e higiene, sumado a esto se debe invertir en su almacenamiento. La rotación del lugar de almacenamiento puede minimizar la acidez generada en el lugar. Esta acidez puede ser la causante de corrosión de metales o materiales estructurales de concreto.

GRAFICA 2.7
BALANCE OFERTA-DEMANDA INTERNA DE AZUFRE (MTPA)



Fuente: Elaboración propia

2.6. PROYECCIONES DE MERCADO

Una vez determinada la situación actual del mercado nacional del azufre (2017), en la siguiente sección se pretende responder a la interrogante: ¿Cuál será la situación del mercado del azufre al año 2025?, para ello el análisis se realizó bajo la premisa de enfocar los esfuerzos sobre el posible aumento de la producción del azufre a recuperar en Pemex Transformación Industrial y en específico en ampliar su infraestructura de Refinación, mediante la implementación de los proyectos “Refinería Dos Bocas Paraíso, Tabasco” e “Implementación de un nuevo tren de Refinación en alguno de los Complejos Petroquímicos en Coatzacoalcos, Veracruz”, siempre y cuando los mismos lleguen a ser una realidad. En el caso del aumento en la producción de azufre mediante recuperación del gas natural y Otras Formas de Azufre (OFA), se recurrió exclusivamente a los datos históricos para realizar la proyección más probable.

2.6.1. PROYECCIÓN DE LA OFERTA NACIONAL

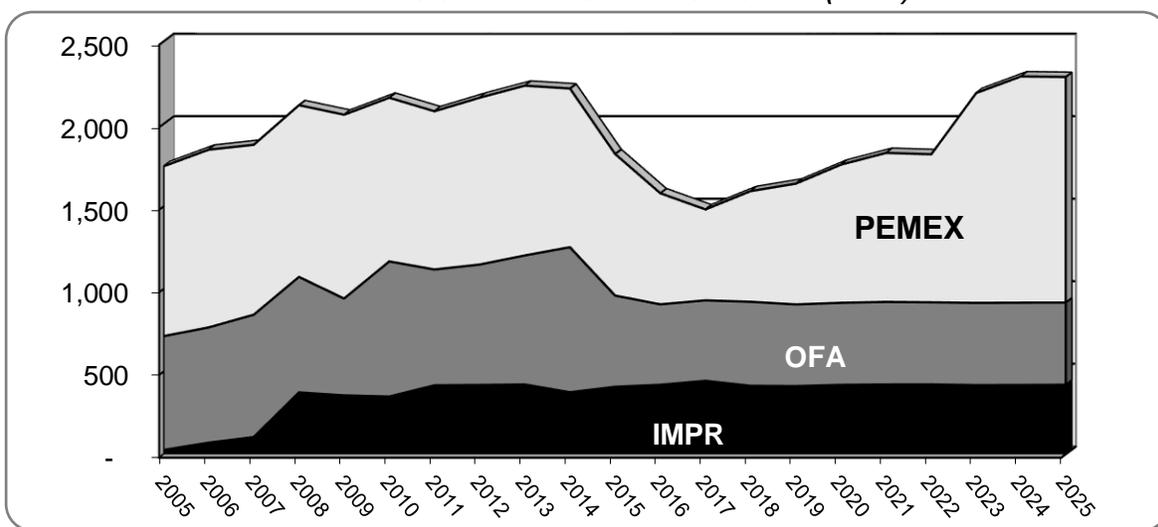
Se estima que para el periodo 2018 -2025 la oferta nacional de azufre tendrá un incremento del 5.29% anual (TCMA), esto debido en gran medida al aumento en la producción de azufre por parte de Pemex Transformación Industrial, la cual registrará un incremento anual del 10.7% para el mismo periodo. Tanto las Otras Formas de Azufre (OFA); así como las importaciones, se estima permanecerán prácticamente constantes, como ha sucedido desde el año 2008. Tales tendencias se registran en la tabla 2.11 y gráfica 2.8.

TABLA 2.11
OFERTA NACIONAL DE AZUFRE PROYECTADA (MTPA)

CONCEPTO	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
PEMEX	671	732	837	903	897	1,271	1,371	1,367
OFA	509	494	497	500	497	498	498	498
IMPORTACIONES	414	412	420	422	422	418	419	420
TOTAL	1,594	1,638	1,754	1,825	1,816	2,187	2,288	2,285

Fuente: Elaboración propia

GRAFICA 2.8
OFERTA NACIONAL DE AZUFRE PROYECTADA (MTPA)



Fuente: Elaboración propia

La proyección del aumento de producción en PEMEX, se analizó considerando por separado a REF y CPG, a su vez, la producción de PR se estudió separándola en tres componentes de aumento de producción de azufre: recuperación de la capacidad de procesamiento de crudo en el SNR a partir de 2019 ^[20], implementación del proyecto “Refinería Dos Bocas Paraíso, Tabasco” “ a partir de 2023 ^[20] e implementación del proyecto “Nuevo tren de Refinación en alguno de los Complejos Petroquímicos en Coatzacoalcos, Veracruz” a partir de 2024 ^[21] a continuación se detalla dicho análisis.

2.6.1.1. REFINERÍAS

I. Recuperación de la capacidad de procesamiento de crudo en el SNR ^[20]

En atención a las problemáticas del SNR, Pemex busca fortalecer los niveles de confiabilidad, para ello ha diseñado un plan de reparaciones que incluye la rehabilitación de Refinerías y reparaciones puntuales en equipos específicos identificados, el plan arranco a principios de 2019.

Estos proyectos de rehabilitación, sumados a la adecuación y modernización de la infraestructura de proceso, permitirán recuperar e incrementar gradualmente la capacidad de producción del SNR que, sin embargo, todavía se mantendrá por debajo de la demanda nacional de petrolíferos, especialmente de gasolina automotriz

Este programa se realizará en tres etapas, en función de la criticidad de las instalaciones. Entre 2019 y 2020 se da mantenimiento a 111 plantas de proceso, 62 componentes en servicios auxiliares, 69 tanques de almacenamiento e instalaciones periféricas.^[21]

En el caso específico de las plantas de azufre tanto de REF como de CPG, en la estrategia 10.2 del “Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024” se plantea que en el periodo 2020 a 2024 se realizara la rehabilitación y reacondicionamiento de las Plantas/Trenes de Recuperación de Azufre a fin de reducir las emisiones de bióxido de azufre en Pemex TRI, de acuerdo con el siguiente cronograma:

<ul style="list-style-type: none"> • Rehabilitación y reacondicionamiento de las Plantas/Trenes de Recuperación de Azufre de: <ul style="list-style-type: none"> ○ Centros Procesadores de Gas: <ul style="list-style-type: none"> ➤ Matapionche, Poza Rica y Arenque: Planta Azufre 1. 2020 ➤ Ciudad Pemex y Nuevo Pemex: Plantas Azufre 1 y 2. 2020-2021 ➤ Cactus: Plantas Azufre 1,2,3,4 y 5. 2020-2023 ○ Refinerías: <ul style="list-style-type: none"> ➤ Cadereyta: Plantas 1,3,4,5 y 6. 2020-2023 ➤ Madero: Trenes Azufre No. II,100,200,300 y 400 2020-2023 ➤ Minatitlán: Planta Azufre 2 (preventivo Azufre 1). 2020-2023 ➤ Salamanca: Plantas Azufre No. 1,2 y 3. 2020-2023 ➤ Salina Cruz: Azufre No. I, II y III. 2020-2023 ➤ Tula: Plantas Azufre 3 y 5 2020-2023

Fuente: SENER, Descripción del programa de rehabilitaciones, 2018.

Lo anterior indica que, en primera instancia, para 2021 se recuperaría la producción histórica de azufre en las refinerías en el SNR, y esto se mantendría al rehabilitar las Plantas de Azufre en el SNR en el periodo 2020-2024.

TABLA 2.12
PRODUCCIÓN DE AZUFRE PROYECTADA POR REHABILITACIÓN DE REFINERIAS
EN EL SNR (MTPA)

EPS	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
REF	130	200	320	400	400	400	400	400
TOTAL	130	200	320	400	400	400	400	400

Fuente: Elaboración propia

II. Implementación del proyecto “Refinería Dos Bocas Paraíso, Tabasco” [22]

El objetivo de este Proyecto es lograr en el mediano plazo la autosuficiencia en la producción de gasolina, de diésel, y de esta manera ofrecer mejores precios de estos combustibles a los consumidores.

Actualmente nuestro país importa casi el 80 por ciento de los combustibles que consume. Esta dependencia energética termina por generar un mayor precio que pagan los consumidores mexicanos. El plan es producir más gasolinas en nuestro país, modernizar las seis refinerías del país y construyendo una nueva, para reducir el costo de los combustibles.

Con el objetivo de incrementar la elaboración de productos refinados de mayor valor agregado en el país, cuidar la balanza comercial e impulsar el desarrollo económico y social del sureste mexicano, el Gobierno de México impulsa la construcción de la Nueva Refinería Dos Bocas, Tabasco, que tendrá una capacidad de 340 mil barriles por día.

La configuración de coquización retardada permitirá generar productos de mayor valor económico y alcanzar las siguientes metas:

- Maximizar el aprovechamiento de la materia prima para la producción de gasolinas y diésel sin producción de asfalto y combustóleo.
- Incrementar la producción del SNR en 173 MBPD de gasolina, 125 MBPD de diésel de ultra bajo azufre, 9.4 MBPD de Propileno, 9.3 MBPD de LPG, 1,128 TPD de Azufre y 8,400 TPD de Coque.
- Incorporar en 2023 al SNR una nueva refinería con 16 plantas nuevas, servicios auxiliares, tanques de almacenamiento, con la capacidad requerida por la norma ambiental, cumpliendo también con la norma de seguridad, protección ambiental y seguridad ocupacional.

TABLA 2.13
PRODUCCIÓN DE AZUFRE PROYECTADA POR NUEVA REFINERÍA DOS BOCAS
(MTPA)

EPS	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
REF						370	370	370
TOTAL						370	370	370

Fuente: Elaboración propia

III. *Implementación del proyecto “Nuevo tren de Refinación en alguno de los Complejos Petroquímicos en Coatzacoalcos, Veracruz”*^[23]

La iniciativa consiste en incorporar, en tres etapas; un esquema de refinación al CP Cangrejera, que permita la producción de petroquímicos (aromáticos-estireno) y combustibles (LPG, gasolina, turbosina, diésel y combustóleo)

El proyecto se basa en:

- Separación de nafta en la planta estabilizadora de crudo.
- Eliminación de nafta importada y sustitución por gasolina natural de los CPG.
- Rehabilitación y mantenimiento de las instalaciones existentes relacionadas con el procesamiento de nafta.
- Aprovechamiento de la hidrodesulfuradora, reformadora e isomerizadora de pentanos del complejo para la producción de gasolina y suministro de carga de nafta para la producción de aromáticos.
- Incorporación de nuevas instalaciones de proceso para completar un esquema de refinación.
- Capacidad de procesamiento de 200 MPBP
- Incrementar la producción del SNR en 89.5 MBPD de gasolina, 22.6 MBPD de diésel de ultra bajo azufre, 19.3 MBPD de turbosina, 262 TPD de Azufre y 74 TMBPD de Combustóleo.
- Incorporar en 2024 al SNR un nuevo tren de refinación con 10 plantas nuevas, 6 plantas rehabilitadas, servicios auxiliares, tanques de almacenamiento, con la capacidad requerida por la norma ambiental, cumpliendo también con la norma de seguridad, protección ambiental y seguridad ocupacional.

TABLA 2.14
PRODUCCIÓN DE AZUFRE PROYECTADA POR NUEVO TREN DE REFINACION
LA CANGREJERA (MTPA)

EPS	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
REF							86	86
TOTAL							86	86

Fuente: Elaboración propia

2.6.1.2. CENTROS PROCESADORES DE GAS

Para la proyección de la recuperación de azufre del gas natural se estima que tendrá un aumento significativo por la rehabilitación y reacondicionamiento de las plantas/trenes de recuperación de azufre. De acuerdo con este argumento, el aumento de producción de azufre por recuperación del gas natural se realizó mediante una proyección lineal de los datos históricos reportados en el periodo 2005-2017 por CPG, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

TABLA 2.15
PRODUCCIÓN DE AZUFRE PROYECTADA EN CPG (MTPA)

EPS	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
CPG	541	532	517	503	497	501	515	511
TOTAL	541	532	517	503	497	501	515	511

Fuente: Elaboración propia

2.6.2. PROYECCIÓN DE LA DEMANDA NACIONAL

Respecto al consumo nacional de azufre, no se tiene registrado algún proyecto de envergadura, tal como la construcción de una planta de ácido sulfúrico, el aumento considerable de exportaciones de azufre o nuevos desarrollos en el sector minero. Por ello, se decidió realizar un escenario “optimista” para la proyección de la demanda nacional de azufre, el cual consistió en proyectar linealmente las ventas de PEMEX, el autoconsumo de las OFA y las exportaciones.

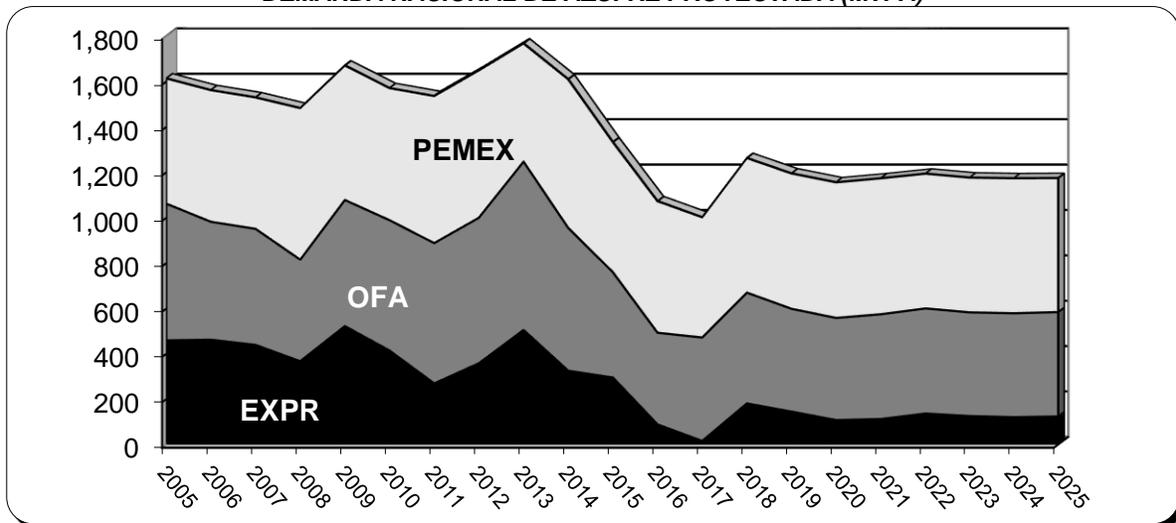
TABLA 2.16
DEMANDA NACIONAL DE AZUFRE PROYECTADA (MTPA)

CONCEPTO	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
PEMEX	593	596	597	599	594	594	595	590
OFA	489	454	451	463	464	458	459	461
EXPORTACIONES	181	145	107	112	136	125	120	123
TOTAL	1,263	1,195	1,155	1,174	1,194	1,177	1,174	1,174

Fuente: Elaboración propia

La proyección lineal de la demanda nacional (grafica 2.9), refleja en un perfil conservador ya que representa el escenario que se ha venido dando desde el año 2005, pues se considera que, de la producción total de azufre a producirse en PEMEX, la mayor parte se colocará en el mercado nacional y el restante se seguirá exportando, en lo que respecta a las OFA, estas seguirán en una tendencia de autoconsumo por parte del sector minero. No obstante, no se puede asegurar que esta tendencia se dé, por ello, en la sección siguiente, se realiza el balance oferta – demanda proyectada en dos escenarios: el primero corresponde a considerar el anterior escenario “optimista” de las ventas futuras de azufre y el otro escenario “pesimista” muestra que sucedería en dado caso que no se pudiera colocar en algún mercado el aumento de producción de azufre que se prevé para el periodo 2018-2025.

GRAFICA 2.9
DEMANDA NACIONAL DE AZUFRE PROYECTADA (MTPA)



Fuente: Elaboración propia

2.6.3. PROYECCIÓN DEL BALANCE OFERTA-DEMANDA

La proyección del balance oferta-demanda nacional de los escenarios “optimista” y “pesimista” se muestra en las tablas 2.17 y 2.18 respectivamente.

En el escenario optimista se presentan incrementos en la oferta y la demanda de azufre conforme a los proyectos que PEMEX tiene programados en este periodo y a la proyección de los datos históricos de este mineral. El resultado de este escenario estima una tasa de crecimiento media anual de 18.92%.

En el escenario pesimista considera la misma tendencia de crecimiento para la oferta al igual que el escenario anterior, mientras que la demanda permanece constante. El resultado de este escenario estima una tasa de crecimiento media anual de 35.51%.

TABLA 2.17
BALANCE OFERTA-DEMANDA NACIONAL DE AZUFRE PROYECTADA
ESCENARIO OPTIMISTA (MTPA)

CONCEPTO	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
OFERTA	1,593	1,638	1,753	1,825	1,816	2,187	2,288	2,285
DEMANDA	1,263	1,195	1,156	1,174	1,194	1,177	1,174	1,175
TOTAL	330	443	597	651	622	1,010	1,114	1,110

Fuente: Elaboración propia

TABLA 2.18
BALANCE OFERTA-DEMANDA NACIONAL DE AZUFRE PROYECTADA
ESCENARIO PESIMISTA (MTPA)

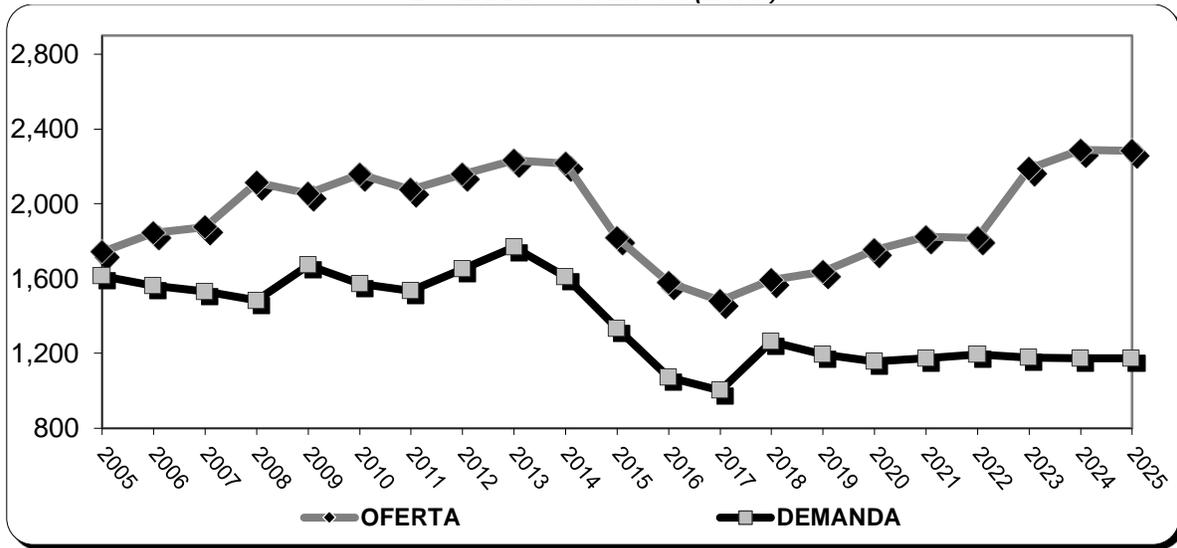
CONCEPTO	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
OFERTA	1,593	1,638	1,753	1,825	1,816	2,187	2,288	2,285
DEMANDA	1,492	1,483	1,477	1,473	1,472	1,457	1,448	1,441
TOTAL	101	155	276	352	344	730	840	844

Fuente: Elaboración propia

Las anteriores tendencias se muestran en las siguientes gráficas, en donde se reporta que para el periodo 2018-2025, se tendría, en el escenario optimista un excedente nacional de azufre (promedio anual) de 735 MTPA, mientras que en el escenario pesimista el exceso de azufre alcanzaría las 455 MTPA.

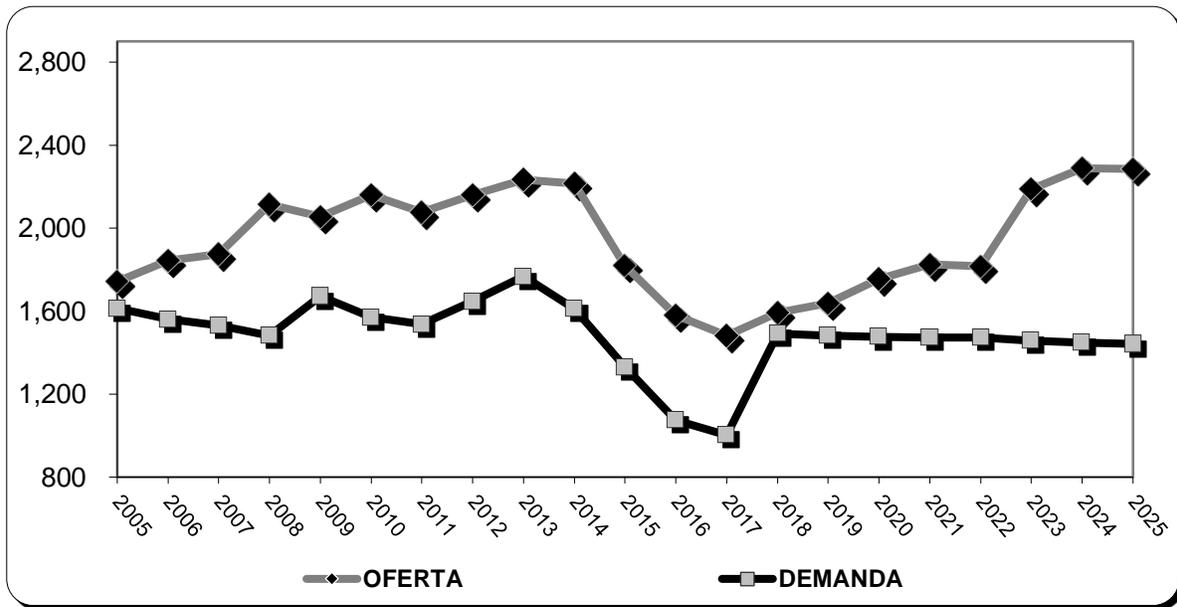
En cualquiera de los dos escenarios planteados, la pregunta obligada es ¿qué sucederá con las cantidades de azufre excedente?

GRAFICA 2.10
BALANCE OFERTA-DEMANDA NACIONAL DE AZUFRE PROYECTADA
ESCENARIO OPTIMISTA (MTPA)



Fuente: Elaboración propia

GRAFICA 2.11
BALANCE OFERTA-DEMANDA NACIONAL DE AZUFRE PROYECTADA
ESCENARIO PESIMISTA (MTPA)



Fuente: Elaboración propia

2.7. PRECIOS DE AZUFRE

Los factores principales que acotan el precio del azufre son:

- a) La disponibilidad del azufre (en el mercado internacional hay un excedente por la recuperación obligada de azufre a partir del petróleo y del gas natural).
- b) La demanda de la industria de fertilizantes fosfatados, principal consumidor del azufre para producir ácido sulfúrico.

En el mercado internacional hay zonas geográficas que presentan excedentes o déficits estructurales, generándose flujos desde las áreas excedentes hacia las deficitarias.

Las regiones más relevantes constituyen un mercado de referencia. Ellas son la costa Golfo de México (Sur Este de E.U./deficitaria); Norte de Europa (Báltico/excedentaria), Sur de Europa (Mediterráneo/excedentaria), Sudeste Asiático (Japón y otros/excedentaria, China/deficitaria), Sudamérica (deficitaria).

En la zona del Golfo de México (Tampa) radica la principal concentración de productores de fertilizantes fosfatados de E.U., dada su disponibilidad de roca fosfórica y su posición cercana a las grandes áreas agrícolas que lo consumen.

Dado que esta zona es demandante tanto de azufre como de ácido sulfúrico, con una cierta capacidad de arbitraje (puede disminuir su producción directa de ácido y por lo tanto de azufre, si el precio del ácido le resulta más atractivo), los precios del azufre y del ácido producidos en Tampa se han constituido en una referencia relevante en el mercado internacional, es decir, los excedentes de ácido mundiales se tienden a colocar allí en competencia con la producción voluntaria de los consumidores. De hecho, se produce un virtual arbitraje entre la producción propia y la compra en el mercado, lo que determina el precio en esa región.

El efecto práctico es que cualquier productor puede colocar su excedente de ácido al precio vigente del Golfo, asumiendo el costo de transporte desde el origen al destino en esa zona. A su vez, cualquier consumidor sabe que puede conseguir ácido al precio señalado más el costo de flete desde el Golfo al destino.

Ello permite configurar los precios de referencia en las restantes zonas. Es así como el precio FOB en la zona sudeste asiático es del orden del precio Golfo más el flete de allí al Golfo.

El segundo mercado de referencia para el precio del azufre es Vancouver, dada la importancia que tiene Canadá como una de las potencias importadoras de este mineral, teniendo como principal socio comercial a China.

China está desarrollando su propia industria de fertilizantes fosfatados procurando una menor dependencia de las importaciones. Ello se ha reflejado desde 2001 en una explosiva demanda de azufre y ácido sulfúrico, presionando al alza los precios de estos productos. ^[24]

En el año 2017 China fue el principal productor mundial de azufre en todas sus formas, principal productor de piritas y fue el principal importador de azufre con un total de 11 MT, lo que representa aproximadamente un tercio de las importaciones mundiales. ^[17]

PRECIO DEL AZUFRE ENCAPSULADO Y/O GRANULADO

En la tabla 2.19 y gráfica 2.12, se muestran los precios del azufre encapsulado y/o granulado para el periodo 2010-2017, de tres mercados de referencia Tampa, Vancouver y Emiratos Árabes Unidos.

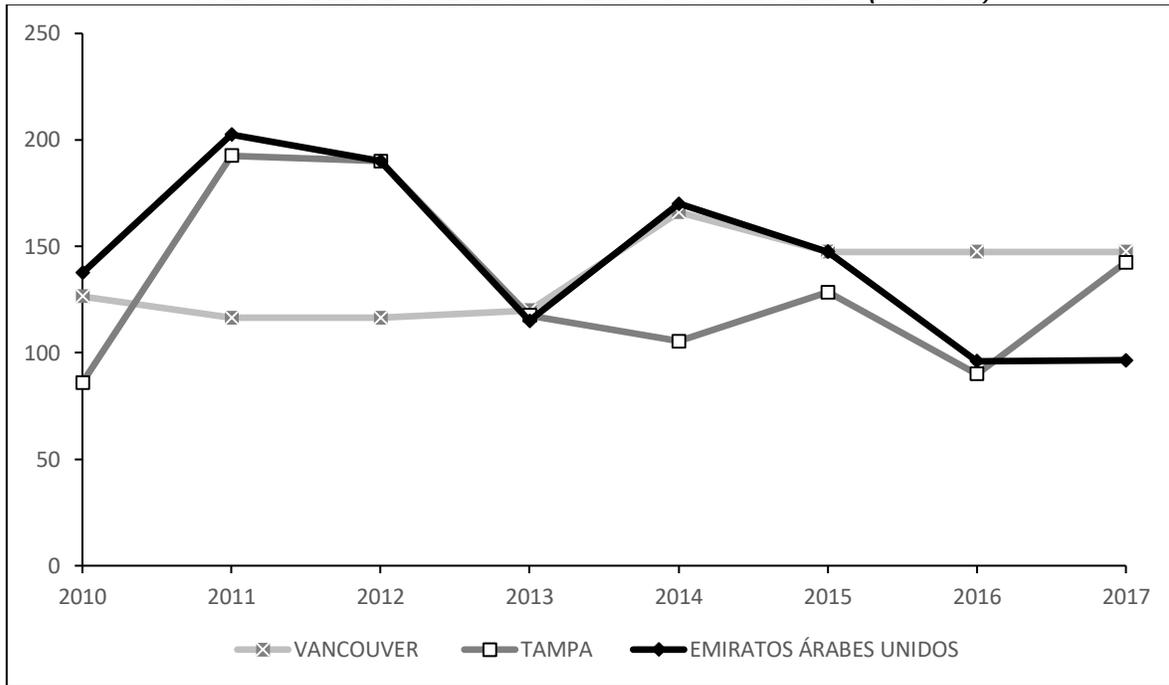
Los precios de Tampa usualmente son los más altos reportados en Estados Unidos debido a la gran demanda de azufre en el área central de Florida.

TABLA 2.19
PRECIOS DEL AZUFRE ENCAPSULADO Y/O GRANULADO
(USD/TON)

AÑO	VANCOUVER	TAMPA	EMIRATOS ÁRABES UNIDOS
2010	126.5	86.0	137.5
2011	116.5	192.5	202.5
2012	116.5	190.0	190.0
2013	120.0	117.5	115.0
2014	166.0	105.5	170.0
2015	140.5	128.5	147.5
2016	140.5	90.0	96.0
2017	140.5	142.5	96.5

Fuente: U.S. Geological Survey (2005-2019)

GRAFICA 2.12
PRECIOS DEL AZUFRE ENCAPSULADO Y/O GRANULADO (USD/TON)



Fuente: Elaboración propia

PROSPECTIVA DEL AZUFRE ENCAPSULADO Y/O GRANULADO

Se prevé que el precio del azufre encapsulado y/o granulado se mantenga constante durante los siguientes años debido a la demanda que hay de los países con déficit de este.

Para conocer el precio del azufre encapsulado y/o granulado se decide hacer un promedio del año 2018 de tres mercados potenciales de azufre de los cuales el precio en el que se vendió para este año fue: Tampa \$90 USD por tonelada, Emiratos Árabes Unidos \$95 por tonelada y Vancouver \$115 USD por tonelada. Por lo tanto, el promedio es de \$100 USD por tonelada y este precio se mantendrá constante durante la proyección de los costos en el periodo 2023-2037.

TABLA 2.20
PRECIOS DEL AZUFRE ENCAPSULADO Y/O GRANULADO PROYECTADO
(USD/TON)

AÑO	UNIDAD	USD/ UNIDAD
2023	TON	\$100
2024	TON	\$100
2025	TON	\$100
2026	TON	\$100
2027	TON	\$100
2028	TON	\$100
2029	TON	\$100
2030	TON	\$100
2031	TON	\$100
2032	TON	\$100
2033	TON	\$100
2034	TON	\$100
2035	TON	\$100
2036	TON	\$100
2037	TON	\$100

PRECIO DEL AZUFRE LÍQUIDO

En la tabla 2.21 y gráfica 2.13 se muestran los precios promedio de ventas externas de azufre líquido de Estados Unidos y México. Los precios de azufre líquido más altos usualmente reportados son los de Estados Unidos por lo cual son tomados como referencia para los precios de México.

Los precios de Estados Unidos son el promedio de las ventas externas de azufre a países tales como: Brasil (35%), México (21%), Marruecos (19%), Nueva Calendonia (10%), China (8%), Canadá (1%) y Otros (6%).^[17]

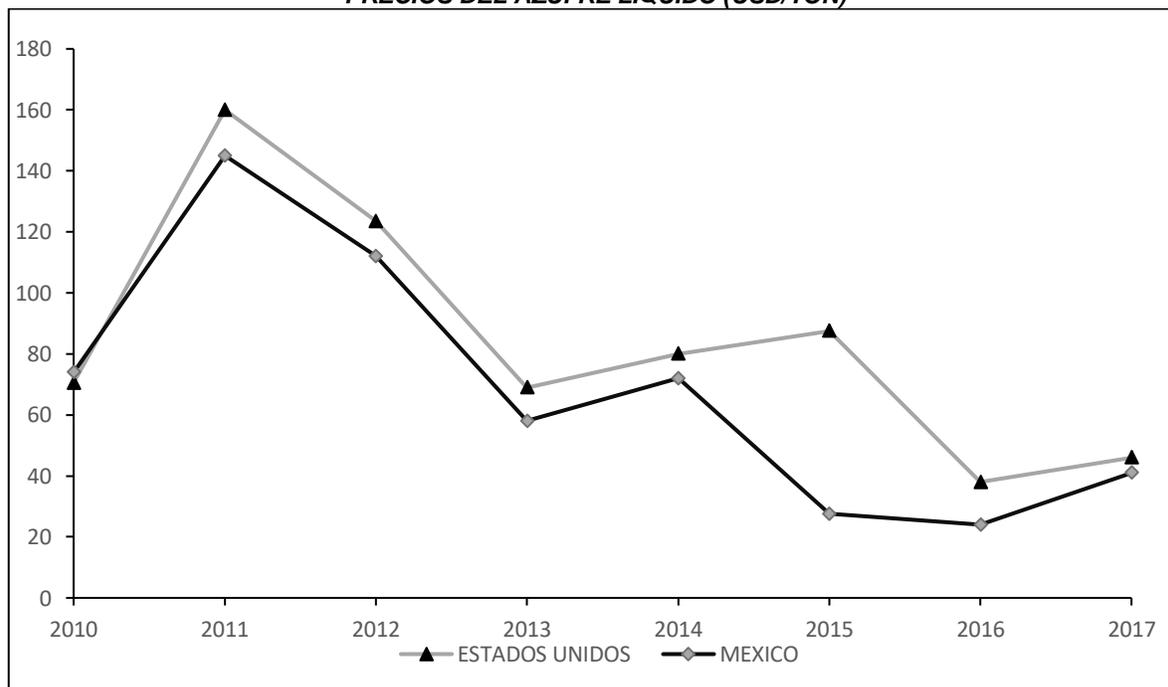
Los precios de México son el promedio de las ventas externas a Estados Unidos. (99%) y el resto a Canadá y Cuba.^[16]

**TABLA 2.21
PRECIOS DEL AZUFRE LIQUIDO
(USD/TON)**

AÑO	ESTADOS UNIDOS	MEXICO
2010	\$70.5	\$74.0
2011	\$160.0	\$145.0
2012	\$123.5	\$112.0
2013	\$69.0	\$58.0
2014	\$80.0	\$72.0
2015	\$87.5	\$27.5
2016	\$38.0	\$24.0
2017	\$46.0	\$41.0

Fuente: U.S. Geological Survey (2005-2019)
Anuario Estadístico de la Minería Mexicana (2005-2017)

**GRAFICA 2.13
PRECIOS DEL AZUFRE LIQUIDO (USD/TON)**



Fuente: Elaboración propia

PROSPECTIVA DEL AZUFRE LÍQUIDO

En la tabla 2.22 se muestra los precios del azufre líquido, para la prospectiva de estos precios se tomaron en cuenta los precios de resultados de operación 2020-2035 Pemex Transformación Industrial.

TABLA 2.22
PRECIOS DEL AZUFRE LÍQUIDO PROYECTADO
(USD/TON)

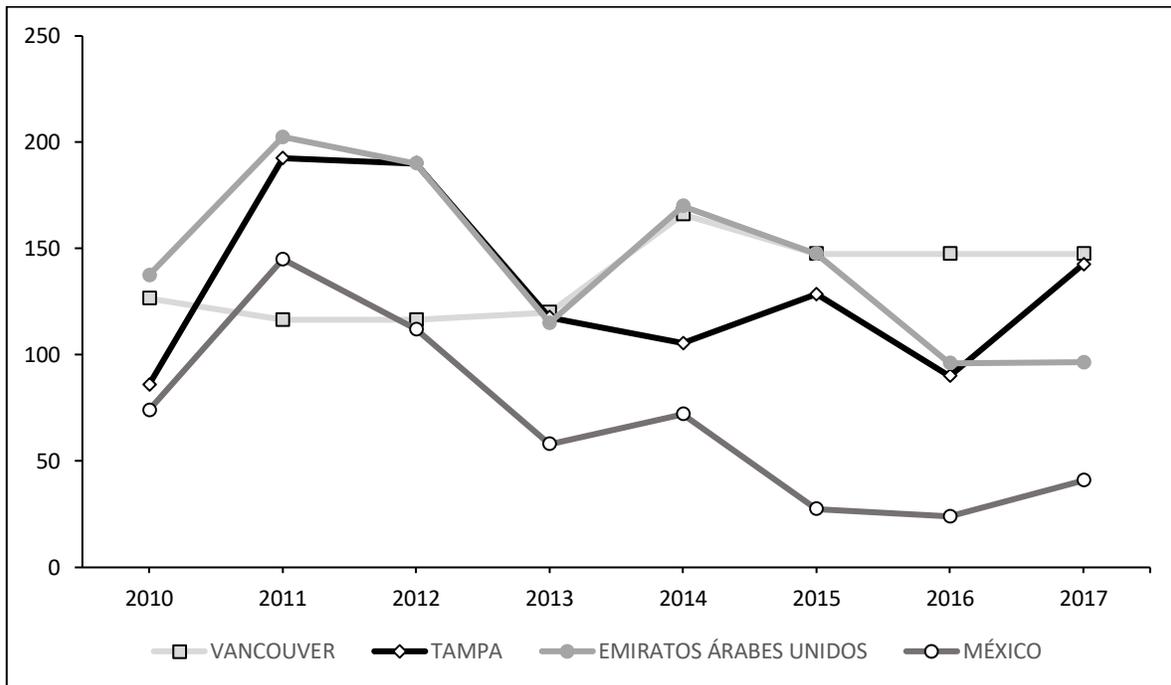
AÑO	UNIDAD	USD/ UNIDAD
2023	TON	\$9
2024	TON	\$8
2025	TON	\$7
2026	TON	\$7
2027	TON	\$6
2028	TON	\$5
2029	TON	\$5
2030	TON	\$5
2031	TON	\$5
2032	TON	\$5
2033	TON	\$5
2034	TON	\$5
2035	TON	\$5
2036	TON	\$5
2037	TON	\$5

DIFERENCIAL DE PRECIO DE AZUFRE ENCAPSULADO Y/O GRANULADO Y AZUFRE LÍQUIDO

El diferencial de precio que existe entre el precio del azufre producido en México y los precios de los mercados de referencia son del orden de los 50-100 USD/TON con respecto al de Tampa, 60-120 USD/TON con respecto al de Vancouver y 50-100 USD/TON respecto al de Emiratos Árabes Unidos, se puede observar que el diferencial de precios entre azufre encapsulado y azufre líquido es amplio por lo cual en caso de implementarse la tecnología de “encapsulado o granulado” de azufre en México se prevé un margen de ganancia del proyecto de inversión.

En la gráfica 2.14 se puede observar que a partir del año 2013 hay un amplio diferencial de precio de los mercados de referencia de azufre encapsulado y/o granulado respecto al mercado de azufre líquido en México.

GRAFICA 2.14
DIFERENCIAL DE PRECIO DE AZUFRE ENCAPSULADO VS AZUFRE LIQUIDO (USD/TON)



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III. ESTUDIO TÉCNICO

3.1. TECNOLOGÍAS DE ENCAPSULADO Y GRANULADO DE AZUFRE

El azufre se encapsula o granula para los siguientes dos propósitos: en primer lugar, para satisfacer los requisitos del proceso de producción, la seguridad y la protección del medio ambiente; en segundo lugar, para obtener azufre estable y de tamaño uniforme en el proceso de transformación y facilitar el transporte, almacenamiento y su uso final.

Existen cinco diferentes procesos de encapsulado y granulado de azufre, cada uno de estos procesos tiene ventajas y desventajas. La selección del proceso depende de las características industriales, el proceso de recuperación de azufre y la escala de producción. El proceso de encapsulado o granulado de azufre varía de acuerdo con el tipo de proceso, por ejemplo: petróleo, gas natural y minería, también varía con la escala de producción, los modos de producción y la estructura del mercado. Es erróneo decir que cierto proceso es adecuado para todos los campos.

Además de los indicadores normales como el consumo de energía y la inversión, se deben considerar los siguientes tres factores al elegir el proceso de encapsulación de azufre:

1. Rendimiento de la unidad de encapsulado o granulación de azufre.
2. Requisitos para el alcance de rendimiento: las materias primas pueden cambiar con el tiempo; el contenido de azufre en el petróleo crudo en particular puede cambiar significativamente y la demanda del mercado de azufre líquido y azufre encapsulado o granulado también puede cambiar, lo que puede causar una gran diferencia entre la producción máxima y la producción promedio. Por lo tanto, se debe considerar si la unidad de encapsulado o granulado puede adaptarse al cambio de producción.
3. Requisitos solicitados para los indicadores de calidad del producto terminado de azufre encapsulado o granulado: en términos de requisitos reales para la aplicación del producto terminado de este, algunas industrias (como la industria de fabricación de ácido sulfúrico) pueden tener requisitos más bajos para el contenido de humedad de azufre encapsulado o granulado.^[4]

Actualmente se identifican cinco procesos de encapsulado o granulado, los cuales son: (1) proceso de encapsulado con rotor y cinturón frío, (2) c, (3) proceso de granulación con agua de enfriamiento, (4) proceso de granulado por aspersion y (5) proceso slate.

A continuación, se describe cada uno de los procesos.

3.1.1. PROCESO DE ENCAPSULADO CON ROTOR Y CINTURÓN FRÍO

Este proceso aprovecha el punto bajo de fusión del azufre, por lo cual este viene fundido desde la fosa o de un recipiente; una bomba entrega el producto a una carcasa giratoria perforada, la cual gira concéntricamente alrededor del estator caliente. El producto sale con un flujo uniforme en forma de gotas el cual es depositado en una correa continua de acero inoxidable. La velocidad de la carcasa rotatoria es sincronizada con la velocidad de la correa móvil para que su deposición del líquido sea suave sobre la correa móvil; debajo de la correa móvil se está rociando agua fría para que se enfríe el producto, esta agua es recogida en tanques y es devuelta al sistema de enfriamiento de agua; este enfriamiento permite que el azufre se enfríe, solidifique y se formen rápidamente las capsulas de azufre a medida que se transportan. El tamaño estándar del encapsulado de azufre es controlado, este método produce poco polvo cuando es descargado el azufre. La producción máxima de capsulas por este proceso en promedio alcanza las 105 MTPA.

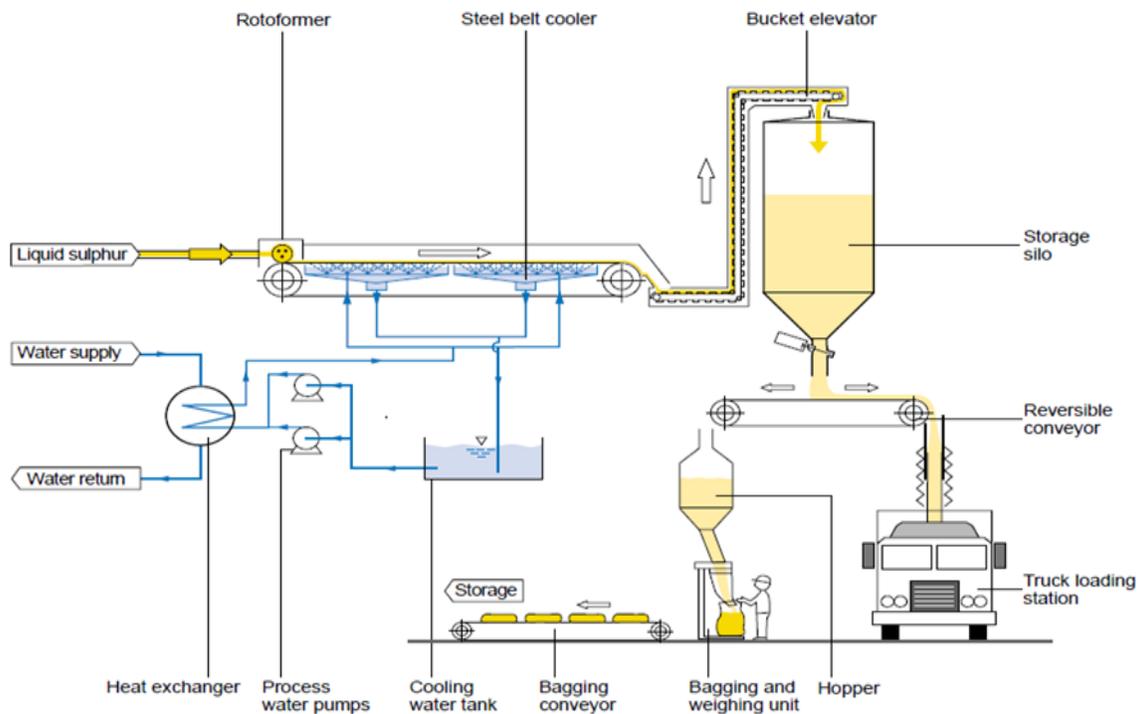


Figura 3.1. PROCESO DE ENCAPSULADO CON ROTOR Y CINTURÓN FRÍO

Fuente: SANDVIK PROCESS SYSTEMS

Este proceso tiene una distribución de tamaño de partícula similar (3 a 6 mm; el diámetro de partícula del encapsulado de azufre) y tiene un tamaño de partícula uniforme sin tamizar ni devolver materiales. El agua de enfriamiento entra en contacto indirecto con el azufre y no hay descarga de residuos ni gases. Este

proceso es simple y directo con menor inversión y consumo de energía, por lo que es el proceso preferido para productores de azufre de capacidad pequeña a intermedia. Sin embargo, la capacidad de manejo de la unidad de recuperación de azufre aumentará con la expansión de la producción; este proceso está limitado por el rendimiento (rendimiento promedio: 105 MTPA) y los niveles de producción más altos sólo se pueden lograr agregando una unidad adicional que cubra la capacidad deseada, por lo que la aplicación a gran escala de este proceso es limitada. [4]

3.1.2. PROCESO DE GRANULACIÓN CON AIRE DE ENFRIAMIENTO EN UNA TORRE

El azufre fundido cae de la parte superior de la torre, en la torre se suministra aire desde la parte inferior hasta la parte superior de esta; el azufre fundido se enfría y se granula debido al aire ascendente y este es recogido al fondo de la torre.

En este proceso no se requiere de agua debido a que hay pocas piezas giratorias y tiene un rendimiento operativo confiable; este proceso es adecuado para la producción en masa, pero una de sus desventajas es que requiere de una gran inversión debido a su alto consumo de energía. [4]

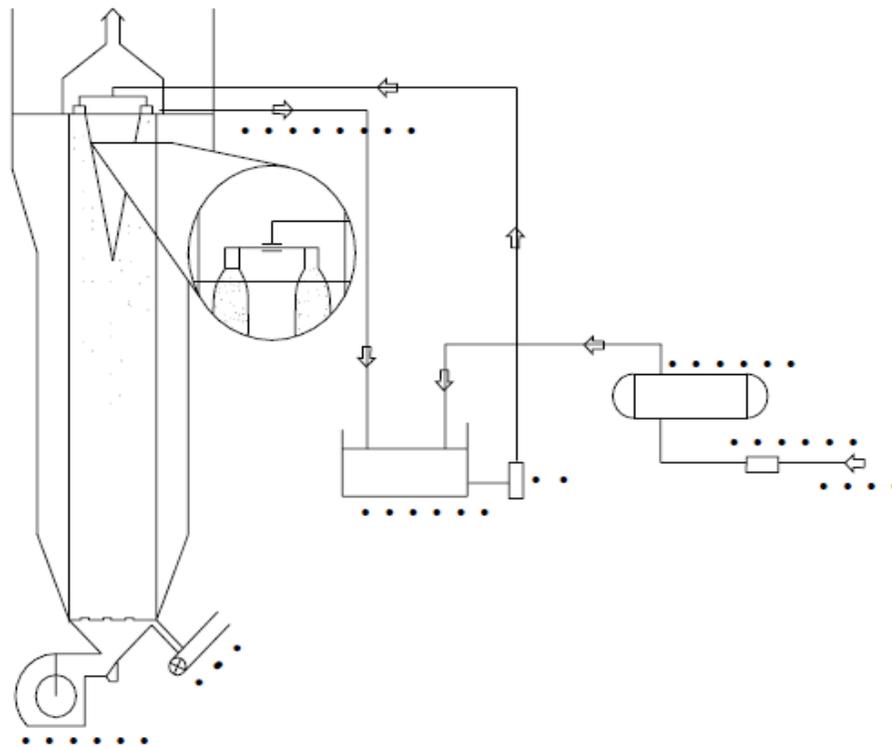


FIGURA 3.2. PROCESO DE GRANULACIÓN CON AIRE DE ENFRIAMIENTO EN UNA TORRE

Fuente: <https://wenku.baidu.com/view/0e16c3cc05087632311212a6.html>

Este proceso requiere una mayor inversión, un mayor consumo de energía y manejo de más gases de escape, por lo que este proceso se ha dejado de utilizar paulatinamente, en los últimos años no ha habido informes de la utilización de este.

3.1.3. PROCESO DE GRANULACIÓN CON AGUA DE ENFRIAMIENTO

El azufre líquido es bombeado a bandejas perforadas a través de las cuales este fluye hacia un baño de agua agitada. Conforme el azufre fundido entra en contacto con el agua fría, se propicia la formación del granulado de azufre, el largo tiempo de transformación del azufre hacen necesario mantener el granulado en suspensión el mayor tiempo posible para permitir que los gránulos se endurezcan.

El azufre granulado es depositado en el fondo de un tanque, por gravedad este fluye al área de secado de alta frecuencia y posteriormente es transportado al área de empaquetamiento y almacenamiento. Por otro lado, el agua de enfriamiento y el azufre granulado que no cumple con los requisitos de tamaño son recuperados de las cribas vibratorias del área de secado y el azufre granulado de tamaño inferior se vuelve a fundir.

El agua de proceso es bombeada de regreso al tanque de agua de enfriamiento, es importante mencionar que esta agua de enfriamiento está contenida en un sistema de circuito cerrado por lo cual el agua de reposición para compensar las pérdidas debidas a la evaporación es mínima. [6]

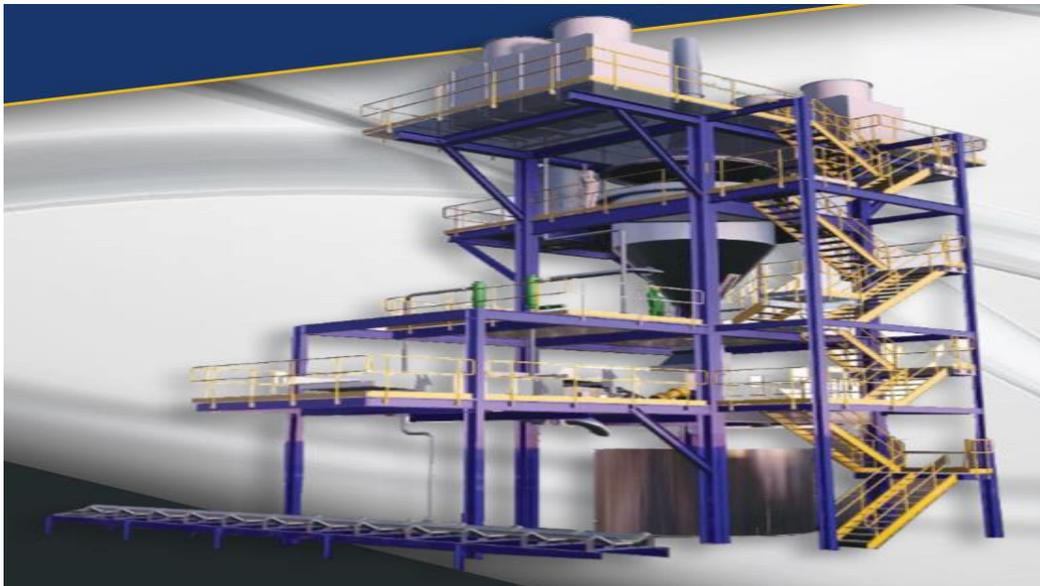


FIGURA 3.3. PROCESO DE GRANULACIÓN CON AGUA DE ENFRIAMIENTO.

Fuente: THE WETPRILL™ FORMING SYSTEM

Este proceso requiere un mayor consumo de energía ya que el azufre granulado entra en contacto directo con el agua de enfriamiento. Los costos de producción y mantenimiento son bajos. Este proceso reporta una capacidad máxima de 875 MTPA y es bastante efectivo y relativamente adecuado para la línea de producción a gran escala, si los requisitos de calidad no son estrictos. [4]

3.1.4. PROCESO DE GRANULADO POR ASPERSIÓN

Este proceso utiliza un aumento de tamaño para transformar azufre líquido a azufre granulado. Se introducen pequeñas partículas de azufre (semillas) en el extremo de alimentación de un tambor giratorio, estas semillas son roseadas con azufre fundido y estas semillas se recubren a medida que el producto se mueve hacia la descarga del tambor. Cada capa que se aplica se debe enfriar hasta solidificar antes de volver a aplicar otra capa de azufre fundido. Con la aplicación de capas sucesivas, las semillas tendrán un aumento de tamaño y peso hasta poder lograr el tamaño de gránulo deseado el cual generalmente es de 1 a 6 mm de diámetro.

Un proceso de cribado separa el granulado que no cumple con el tamaño requerido y estos son transportados al tambor de semillas. [6]

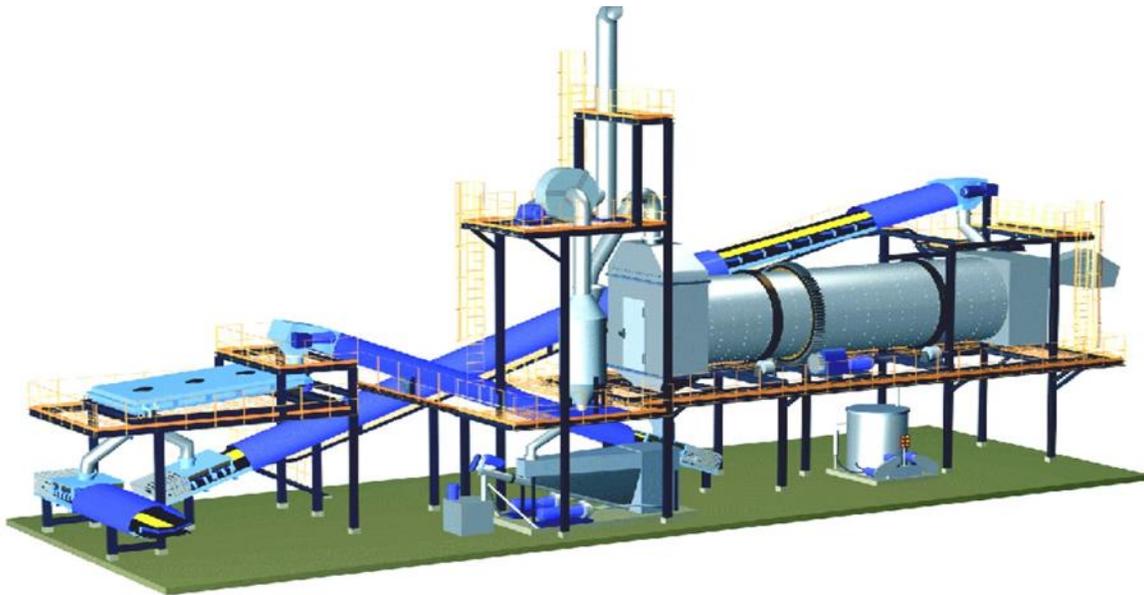


FIGURA 3.4. PROCESO DE GRANULADO POR ASPERSIÓN

Fuente: <https://wenku.baidu.com/view/0e16c3cc05087632311212a6.html>

La inversión en este proceso es alta, se cree que la aplicación de este proceso no tiene una perspectiva prometedora, este es adecuado para la producción a gran escala ya que su producción promedio es de 770 MTPA, con un rendimiento comparativamente fijo, pero menos flexible y no es adecuado para el encapsulado con un mayor rendimiento. [4]

3.1.5. PROCESO SLATE

Este proceso se desarrolló para convertir el azufre fundido en azufre sólido que pueda almacenarse y manipularse utilizando técnicas convencionales de manipulación y que fuera de bajo costo y alto volumen de producción.

Se utiliza una bandeja que dispersa el azufre líquido de manera uniforme a una cinta de movimiento lento, en la cual el azufre líquido se enfría y luego se forman piezas de azufre en una lámina sólida. El enfriamiento es logrado mediante aire y la inmersión de agua, ya que la correa transporta el azufre al punto de descarga y cuando el azufre se separa de esta correa se forman piezas de azufre que van de 3 a 5 mm y estas piezas tienen forma irregular y con bordes afilados. [6]

Este proceso al igual que el proceso de granulación con aire de enfriamiento en una torre han quedado obsoletos por lo cual no hay mucha información de estos procesos y son mencionados para fines académicos.

3.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS Y PROVEEDORES

Así como hay una versatilidad de tecnologías para encapsular o granular el azufre, para cada tecnología hay más de un proveedor con diferentes características de estas tecnologías. En esta sección, se muestran (tablas 3.1, 3.2 y 3.3) las características de los diferentes proveedores de estas tecnologías.

Esta información nos permitirá seleccionar cual tecnología es la más idónea para cada Caso de Estudio y en particular para el Caso de Estudio de la Refinería “Francisco I. Madero”, en Ciudad Madero, Tamaulipas.

TABLA 3.1
CARACTERÍSTICAS DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS Y PROVEEDORES

CARACTERÍSTICAS	Proceso de encapsulado con rotor y cinturón frío. ZAFARAN (ZP5) ^[25]	Proceso de encapsulado con rotor y cinturón frío. IPCO (ROTOFORM RF S8) ^[7]	Proceso de encapsulado con rotor y cinturón frío. SANDVIK (ROTOFORM 3000) ^[26]	Proceso de encapsulado con rotor y cinturón frío. IPCO (RF HS) ^[7]	Proceso de encapsulado con rotor y cinturón frío. SANDVIK (ROTOFORM HS) ^[26]
Capacidad de producción (MTPA)	42	46	50	96	105
Temperatura de alimentación (°C)	NP	125-145	125-135	125-160	125-145
Consumo de energía (kWh)	20	NP	8	NP	NP
Consumo de agua (m³/h)	Sin consumo neto de agua	Sin consumo neto de agua	Sin consumo neto de agua	Sin consumo neto de agua	Sin consumo neto de agua
Consumo de vapor VBP (kg/h)	50	NP	68	NP	NP
Aire de servicios	Requiere	Requiere	Requiere	Requiere	Requiere
Descarga de residuos (mg/m³)	No tiene	No tiene	No tiene	No tiene	No tiene
Uso de aditivos	NRQ	NRQ	NRQ	NRQ	NRQ
Tamaño de encapsulado (mm)	2 a 6	3 a 5	2 a 6	3 a 5	2.5 a 5
Producto terminado	Cápsulas	Cápsulas	Cápsulas	Cápsulas	Cápsulas
Dimensiones (m)					
Altura	1.7	NP	1.9	NP	NP
Ancho	2		2.2		
Longitud	13		14		
Peso (kg)	5,500	NP	6,000	NP	NP

Fuente: Elaboración propia

NP, No Presenta

NRQ, No Requerido

TABLA 3.2
CARACTERISTICAS DE LAS DIFERENTES TECNOLOGIAS Y PROVEEDORES

CARACTERISTICAS	Proceso de granulación con agua de enfriamiento. ENERSUL (WetPrill) [27]	Proceso de granulado por aspersion. ZAFARAN (ZG15) [25]	Proceso de granulado por aspersion. ENERSUL (GXM3) [27]	Proceso de granulado por aspersion. ZAFARAN (ZG30) [25]	Proceso de granulado por aspersion. ENERSUL (GXM1) [27]
Capacidad de producción (MTPA)	875	126	175	252	525
Temperatura de alimentación (°C)	130	NP	NP	NP	NP
Consumo de energía (kWh)	NP	40	55	75	129
Consumo de agua (m³/h)	3	0.6	09-1.1	1.2	2.7-3.0
Consumo de vapor VBP (kg/h)	50	210	100	320	98
Aire de servicios	Requiere	NP	NP	NP	NP
Descarga de residuos (mg/m³)	No tiene	No tiene	No tiene	No tiene	No tiene
Uso de aditivos	NRQ	NRQ	NRQ	NRQ	NRQ
Tamaño de encapsulado (mm)	2 a 6	2 a 6	2 a 6	2 a 6	2 a 6
Producto terminado	Gránulos	Gránulos	Gránulos	Gránulos	Gránulos
Dimensiones (m)					
Altura	12.8	4.5	8.5	6.3	7.3
Ancho	4.5	4.5	4.9	4.88	11
Longitud	7.5	9	11.5-14.3	15.3	17
Peso (kg)	NP	13,500	NP	30,000	NP

Fuente: Elaboración propia

NP, No Presenta

NRQ, No Requerido

TABLA 3.3
CARACTERISTICAS DE LAS DIFERENTES TECNOLOGIAS Y PROVEEDORES

CARACTERISTICAS	Proceso de granulación con agua de enfriamiento. SANVIK (Single-pass) [28]	Proceso de granulado por aspersión. IPCO [7]
Capacidad de producción (MTPA)	595	770
Temperatura de alimentación (°C)	159	125-150
Consumo de energía (kWh)	49	NP
Consumo de agua (m³/h)	NP	NP
Consumo de vapor VBP (kg/h)	NP	NP
Aire de servicios	NP	NP
Descarga de residuos (mg/m³)	31	40
Uso de aditivos	NRQ	NRQ
Tamaño de encapsulado (mm)	2 a 6	2 a 5
Producto terminado	Gránulos	Gránulos
Dimensiones (m) Altura Ancho Longitud	NP	NP
Peso (kg)	NP	NP

Fuente: Elaboración propia

NP, No Presenta

NRQ, No Requerido

3.3. DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS TÉCNICOS DE CASO DE ESTUDIO

Para continuar con el estudio de perfil técnico económico y determinar la viabilidad de la tecnología de “encapsulado o granulado” de azufre con base a la información desarrollada en los capítulos previos se plantea como Caso de Estudio, la implementación de una Planta de “encapsulado o granulado” de azufre en la Refinería “Francisco I. Madero”, en Ciudad Madero, Tamaulipas, la cual cuenta principalmente con las siguientes Unidades de Proceso:

TABLA 3.4
CAPACIDAD DE PROCESO

Proceso	Miles de Barriles Diarios
Destilación atmosférica de crudo	190
Destilación al vacío	91
Desintegración	61
Reformación de naftas	30
Hidrodesulfuración	182
Alquilación e isomerización	22
Coquización	50
	Toneladas Métricas Diarias
Planta de Recuperación de Azufre	600

Fuente: Elaboración propia

Al producir los petrolíferos en la Refinería, uno de los subproductos generados es el azufre, el cual se procesa con la unidad de recuperación de azufre U-080; con capacidad instalada de 600 TPD (219 MTPA), e instalada en un área de 36,572 m². Esta unidad se divide en cuatro trenes, los cuales tienen una capacidad de 150 TPD (54 MTPA) cada uno. Actualmente los trenes no operan al 100% de su capacidad debido a la reducción de procesamiento de crudo.

Si se considera que: 1) los estudios, la ingeniería, el paquete de concurso y el proceso de licitación para implementar el proyecto de la construcción de una Planta de “solidificación” de azufre se realizaran en el año 2020, 2) durante el año 2022 se llevara a cabo la construcción de esta planta y 3) en el año 2023 se iniciaría la producción, la definición de la capacidad de procesamiento de la Planta de “solidificación” de azufre, estaría supeditada tanto a la capacidad de producción con que se cuente en la Refinería a partir del año 2023 así como los potenciales excedentes de azufre a nivel nacional. Los resultados principales del estudio de mercado indican que en el año 2017 se tuvo un excedente de 480 MTPA de azufre a nivel nacional, en el año 2020 se espera tener un excedente de 276 MTPA, para 2023 se prevé que habrá 730 MTPA y en el año 2025 un excedente de 843 MTPA.

Para el año 2023 la producción de azufre en la Refinería de Madero representaría aproximadamente el doce por ciento del excedente de azufre a nivel nacional, lo cual indica que sería factible en primera instancia procesar el 100% de la producción, con el fin de obtener azufre “encapsulado o granulado”, no obstante, se considera un escenario conservador, el cual implica procesar aproximadamente el 65% de la producción de azufre en la Refinería.

En función de lo anterior la capacidad de la Planta de “encapsulado o granulado” de azufre para el presente Caso de Estudio se estima en 50 MTPA, con lo cual a su vez también podría procesarse la totalidad de la producción de azufre de uno de los cuatro trenes de la U-080 si es que estos llegasen a operar al 100% de su capacidad.

3.4. BASES DE DISEÑO

I. GENERALIDADES

La Planta de “encapsulado o granulado” de azufre se instalará en el estado de Tamaulipas, en la Refinería Madero con capacidad normal de 50 MTPA con lo cual se abarcará la producción total de uno de los cuatro trenes de la planta U-080 de la Refinería.

Por lo anterior, con el fin de complementar y/o confirmar información básica para su diseño conceptual, se desarrollan las siguientes Bases de Diseño.

A. FUNCIÓN DE LA PLANTA

La Planta de “encapsulado o granulado” de azufre tiene la función de transformar el azufre líquido que es obtenido como subproducto en la refinación de crudo en la Refinería de Madero en azufre “encapsulado o granulado”.

II. CAPACIDAD, FACTOR DE SERVICIO Y FLEXIBILIDAD

A. CAPACIDAD

Se establecen los valores de las diferentes capacidades permisibles para la Planta de “encapsulado o granulado” de azufre.

DISEÑO	50 MTPA
NORMAL	50 MTPA
MÍNIMO	30 MTPA

B. FACTOR DE SERVICIO

La planta operará 24 horas al día durante 350 días al año, equivalente a un factor de servicio de 0.96.

C. FLEXIBILIDAD

LA PLANTA DEBERÁ SEGUIR OPERANDO BAJO LAS SIGUIENTES CONDICIONES:

a. FALLA DE ELECTRICIDAD SI ___ NO X

OBSERVACIONES: A falta de energía eléctrica la planta no operará y se efectuará un paro ordenado y seguro de la misma.

b. FALLA DE VAPOR SI X NO ___

c. FALLA DE AIRE SI ___ NO X

OBSERVACIONES: A falta de aire de instrumentos la planta no operará y se efectuará un paro ordenado y seguro de la misma.

d. FALLA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO SI ___ NO X

OBSERVACIONES: A falta de suministro de agua la planta no operará y se efectuará un paro ordenado y seguro de la misma.

III. PREVISIÓN PARA AMPLIACIONES FUTURAS

No se prevén aumentos de capacidad por futuras ampliaciones.

IV. ESPECIFICACIÓN DE LA ALIMENTACIÓN

La alimentación de la Planta de “encapsulado o granulado” tendrá las siguientes características:

Azufre líquido	
Contenido de azufre	No menos a 99.8 %
Contenido de cenizas	No más de 60 ppmw
Contenido de ácido (calculado por H ₂ SO ₄)	Menos de 0.005%
Contenido de componente orgánico	Menos de 0.05%
Contenido de H ₂ S	Menos de 10 ppm
Contenido de Arsénico	Menos a 0.001%
Viscosidad	4 cP a 125°C

V. CONDICIONES DE LA ALIMENTACION REQUERIDA EN LÍMITES DE BATERÍA

AZUFRE		
Estado físico	Líquido	
Presión	1.5 a 2	Kg/cm ²
Temperatura	125 a 135	°C
Punto de envío	Fosa F-101	

VI. ESPECIFICACION DEL PRODUCTO

AZUFRE “ENCAPSULADO O GRANULADO”	
Estado físico	Sólido (capsulas o gránulos)
Humedad	Menos de 0.1%
Friabilidad	Menos del 1%
Pureza	99.8%
Tamaño	2 a 6 mm

VII. CONDICIONES DEL PRODUCTO EN LÍMITES DE BATERIA.

Producto	Destino	Estado físico	Forma de Envío
Azufre “encapsulado o granulado”	Almacenamiento	Sólido (capsulas o gránulos)	Sacos

VIII. AGENTES QUÍMICOS Y CATALIZADORES.

No aplica para este proceso

IX. EFLUENTES

A. EFLUENTE A LA ATMOSFERA

El polvo de azufre será emitido a la atmósfera y cumplirá con la norma NOM-085-SEMARNAT-2011.

B. EFLUENTES LIQUIDOS

El único efluente líquido es el agua de enfriamiento, pero al no hacer contacto directo con el azufre esta será recirculada a la torre de enfriamiento.

X. INSTALACIONES REQUERIDAS PARA ALMACENAMIENTO

A. ALIMENTACIÓN

Para el almacenamiento de la materia prima, no será necesario disponer de un tanque de almacenamiento debido a que este viene directamente de la fosa F-101 de la unidad U-080.

B. PRODUCTO

Para el almacenamiento de los productos, se considera una tolva de almacenamiento, la cual contará con una estructura de soporte de acero y un contenedor de almacenamiento de acero inoxidable 304 en donde se puede almacenar el producto temporalmente durante 45 minutos, así como un espacio físico de 324 m² el cual tendrá la capacidad de almacenar mil toneladas por siete días.

XI. SERVICIOS AUXILIARES

La Refinería proporcionará todos los servicios auxiliares en límites de batería según se indica a continuación.

A. VAPOR

Vapor de Baja Presión en L.B.

	Min.	Nor.	Máx.
Presión, kg/cm ² m.		3.5	
Temperatura, °C		148	
Calidad	Saturado		

B. AGUA DE ENFRIAMIENTO

Condiciones de suministro dentro de límites de batería			
	Min.	Nor.	Máx.
Presión, kg/cm ² man.	4.5	5.0	5.5
Temperatura, °C	28	32	34
Disponibilidad	La requerida		
Condiciones de retorno dentro de límites de batería			
	Min.	Nor.	Máx.
Presión, kg/cm ² man.		3.5	
Temperatura, °C		42	

C. AIRE

Condiciones en el cabezal de distribución	
Presión, kg/cm ² man.	-7.0/4.5 mín
Temperatura °C	Ambiente, 40 máx
Temperatura de rocío, °C, mín/nor/máx	-32/-20/-10
Humedad	Seco
Impurezas (aceite, etc)	Ninguna
Disponibilidad	No hay disponibilidad

D. ENERGÍA ELÉCTRICA

Servicio	Intervalo de Potencia del motor (HP)	Tensión de diseño (V)	Tensión de suministro (V)	Fase (Ø)	Hertz (Hz)
a) Motores	Menor a 1	127/220	480	1/3	60
	1 a 150	460			
	150 a 1500	4160			
	1500 y mayores	13800			
b) Control de motores		127/220		1	60
c) Iluminación (int/ext)		127/220		3	60
d) Instrumentos		127/220/480		3	60

XII. CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS**A. TEMPERATURA**

Media anual, °C	26
Media mensual más alta, °C	29.4
Media mensual más baja, °C	19.4
Máxima extrema, °C	38
Mínima extrema, °C	2
Máxima promedio, °C	36
Mínima promedio, °C	14
De bulbo húmedo máxima, °C	27.8
De bulbo húmedo mínima, °C	11

B. PRECIPITACIÓN PLUVIAL

Máxima en 1 hora, mm	72
Máxima en 24 horas, mm	230
Promedio del mes más lluvioso, mm	219
Anual acumulada máx, mm	1044
Media acumulada (enero-junio)	244

C. VIENTO

Dirección de los vientos reinantes	SE a NO
Dirección de los vientos dominantes	NE a SO
Velocidad máxima, km/h	190
Velocidad media en verano, km/h	20 (dirección E-O)
Velocidad media en primavera-invierno, km/h	35 (dirección N-S)
Velocidad regional, km/h	270
Velocidad básica, km/h	22

D. HUMEDAD RELATIVA

Máxima	86%
Mínima	60%
Promedio en 30 días	69%
Promedio anual	75%

E. ATMÓSFERA

Presión Barométrica	760 mm Hg (14.7 psig)
Corrosividad	De mar y refinería
Contaminantes	SO _x , H ₂ S, humedad, sales marinas

XIII. DESFOGUE

No requiere de sistema de desfogue

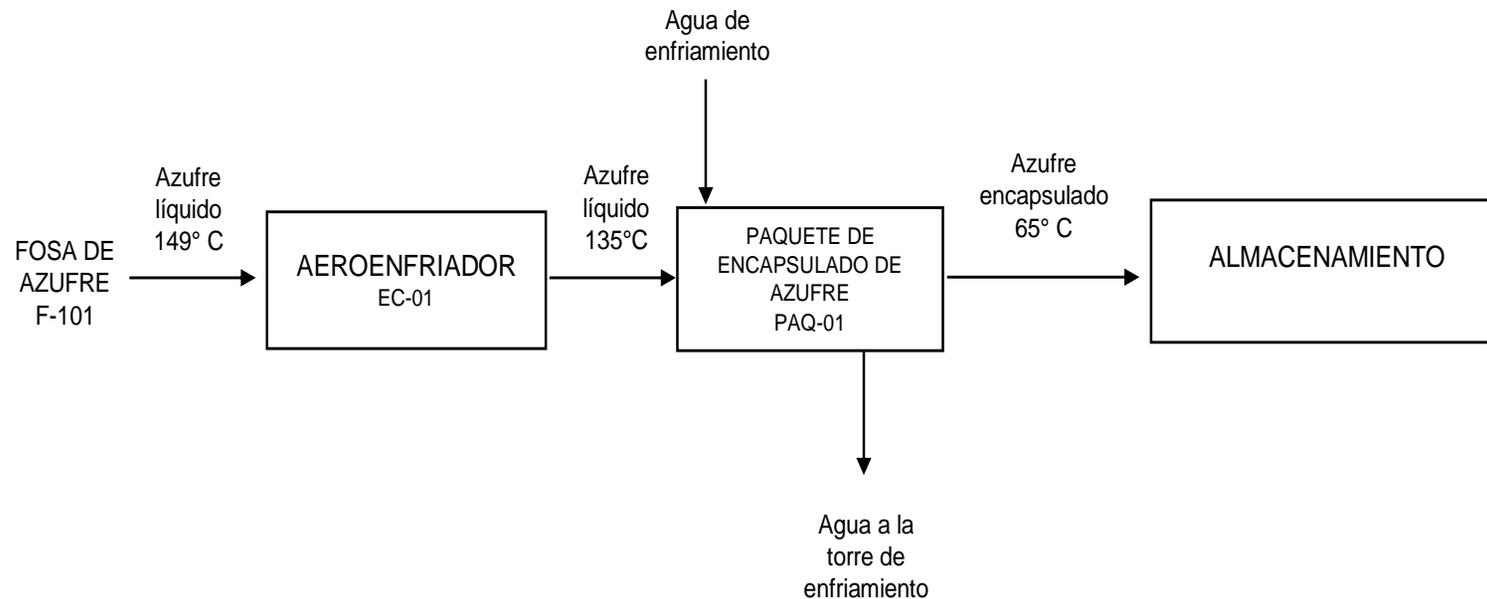
3.5. SELECCIÓN DE PROVEEDOR PARA CASO DE ESTUDIO

Para el Caso de Estudio se realizó un análisis a partir de las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 de las diferentes tecnologías de encapsulado y/o granulado de azufre en donde se selecciona la tecnología de SANDVIK (Rotoform 3000) el cual es un proceso de encapsulado con rotor y cinturón frío en donde se obtendrá como producto capsulas de azufre. A continuación, se enlistan las razones principales de la selección de este proveedor:

- La capacidad de procesamiento de uno de los trenes de la unidad U-080 (54 MTPA) es similar a la capacidad de producción del Paquete de encapsulado (50 MTPA).
- Esta tecnología es adaptable al cambio de producción debido a que se pueden implementar los equipos Rotoform 3000 que sean necesarios para obtener la producción requerida (modularización).
- Cada unidad de Rotoform 3000 puede funcionar de forma independiente y dentro de un rango de capacidad del 60% al 100% lo que proporciona flexibilidad.
- Esta tecnología cumple con los indicadores de calidad que solicita los fabricantes de ácido sulfúrico debido a que su contenido de humedad es bajo.
- El consumo de energía de esta tecnología es bajo comparado con otras.
- El consumo de agua de enfriamiento es mínimo debido a que no hace contacto directo con el azufre.
- El mantenimiento requerido por el equipo es menor.
- Rápida puesta en marcha y paro de la planta.
- Alta disponibilidad de operación: hasta 8,400 horas/año

3.6. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO

El proceso de formación de encapsulado comienza cuando el azufre líquido es transportado por medio del rack de tuberías desde la fosa de azufre F-101 al aerofriador EC-01, la temperatura del azufre líquido a la salida del equipo EC-01 es de 135°C. Posteriormente es transportado a la alimentación del Paquete de encapsulado de azufre PAQ-01 (Rotoform 3000), en este equipo a través del estator y dentro de la barra dosificadora, el azufre atraviesa por las boquillas de la barra dosificadora, la cual asegura una distribución uniforme. Las gotas de azufre se forman cuando el azufre presurizado en la barra dosificadora es forzado a través de las aberturas temporales creadas por los orificios en la carcasa giratoria. Las gotas de azufre son depositadas sobre (y se llevan) la cinta de acero inoxidable, se rocía agua fría contra la parte inferior de la correa de acero inoxidable, lo que hace que las gotas de azufre se enfríen y se encapsulen. A medida que la correa transporta las capsulas de azufre sobre la polea de descarga, el raspador de descarga las retira. A continuación, las pastillas terminadas se colocan en sacos, se transportan y finalmente se almacenan. ^[26]



3.7. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA (ENTRADAS Y SALIDAS)

A continuación, se muestra el balance de materia y energía de la Planta de encapsulado de azufre.

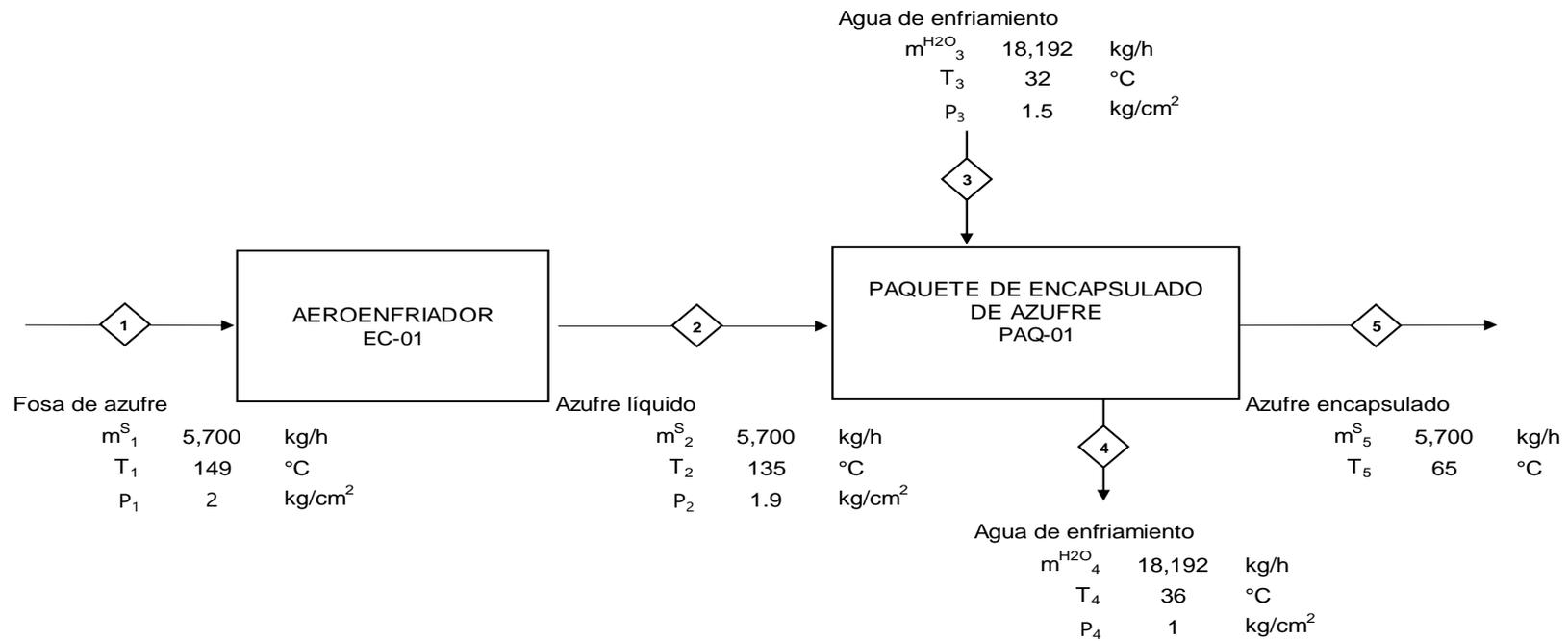


TABLA DE BALANCE					
Corriente	1	2	3	4	5
Variable					
Flujo másico (kg/h)	5,700	5,700	18,192	18,192	5,700
Temperatura (°C)	149	135	32	36	65
Presión (kg/cm ²)	2	1.9	1.5	1	-

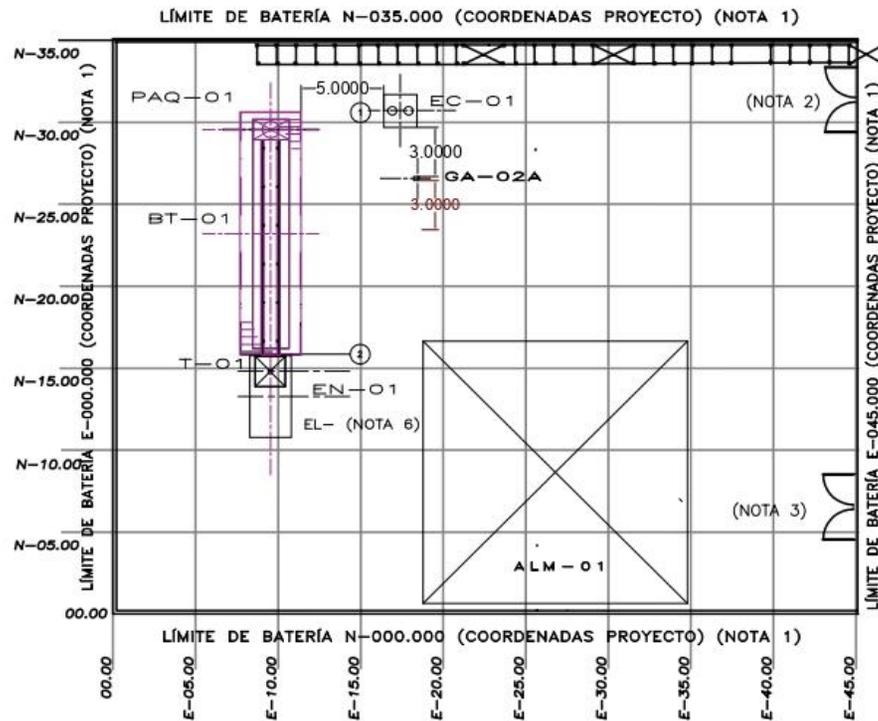
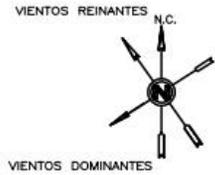
3.8. PLANO DE LOCALIZACIÓN GENERAL PRELIMINAR

Para hacer la selección de la localización de la Planta de encapsulado de azufre se tomaron en cuenta ciertas premisas, las cuales son mencionadas a continuación:

- Disponer de un área suficiente para poder colocar el Paquete de encapsulado de azufre con capacidad de 50 MTPA y un peso de 6,000 kg y se considera la dirección segura con base a los vientos reinantes y dominantes.
- Es factible que se puedan llevar a cabo los trabajos de construcción, mantenimiento y operación necesarios para el Paquete en forma segura.
- La ubicación se seleccionó debido a que es la más cercana a la planta U-080 de azufre, la cual suministrará la materia prima que se requiere.
- El rack de tuberías de donde se tomarán los servicios auxiliares se encuentra situado cerca del Paquete de encapsulado.
- Esta ubicación se encuentra cerca de vías de comunicación tales como ferrocarriles y embarcaciones, que eventualmente nos permitirán transportar el producto.
- Las coordenadas de la unidad son propuestas, y se establecieron con base en la disponibilidad de espacio y servicios auxiliares; sin embargo, durante el desarrollo de la ingeniería de detalle, procura y construcción se deberán precisar las mismas.

En esta sección se muestra el plano de localización general de equipo y el croquis de localización de la Planta de encapsulado de azufre en la Refinería de Madero, para la realización del plano se tomó en consideración la norma NRF-010 de PEMEX.

La ubicación de la Planta de encapsulado de azufre estará situada a un costado de la U-080 en la calle No.12 en el suroeste de la Refinería de Madero.



NOTAS :

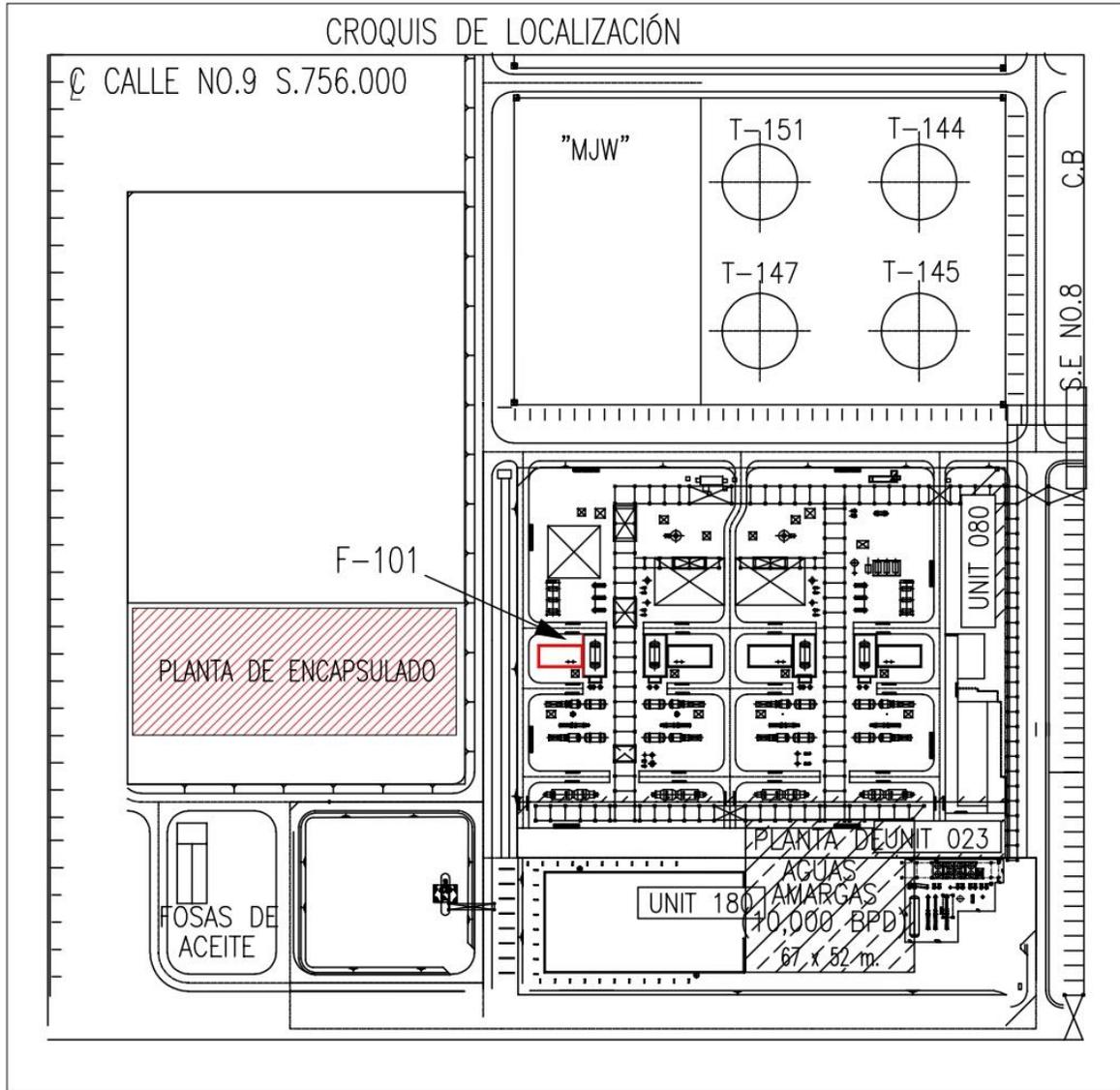
- 1.- COORDENADAS PROPUESTAS PARA EL PROYECTO.
- 2.- ACCESO A PERSONAL.
- 3.- ACCESO DE VEHICULO PARA SACOS DE AZUFRE ENCAPSULADO.
- 4.- CARACTERÍSTICAS QUE SERÁN DETERMINADAS EN ETAPAS POSTERIORES
- 5.- LA UBICACIÓN DEFINITIVA DE LOS EQUIPOS SE DETERMINARÁ EN LAS ETAPAS POSTERIORES DE DESARROLLO DE INGENIERÍA.
- 6.- LA ELEVACIÓN SERÁ DETERMINADA EN LAS ETAPAS POSTERIORES DE DESARROLLO DE INGENIERÍA.

LISTA DE EQUIPO

CLAVE	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS
EQUIPO ESPECIAL		
PAQ-01	PAQUETE DE ENCAPSULADO	Capacidad: 6000 kg/h
EN-01	ENSACADORA DE ENCAPSULADO DE AZUFRE	
T-01	TOLVA DE AZUFRE ENCAPSULADO	
BT-01	BANDA TRANSPORTADORA DE AZUFRE ENCAPSULADO	BOBIS = 6,000 kg/h., POTENCIA = NOTA 4
EC-01	ENFRIADOR DE AZUFRE LIQUIDO	Capacidad: 6,000 kg/h Potencia: 1.5 kW
GA-02A	BOMBA DE AGUA	Capacidad: 18,192 kg/h Potencia: 1/2 hp
GA-02B	BOMBA DE AGUA	Capacidad: 18,192 kg/h Potencia: 1/2 hp
EDIFICIOS		
ALM-01	ALMACEN	Capacidad: 1000 toneladas

P.M. 8004						FECHAS		"ESTUDIO DE PERFIL TÉCNICO-ECONÓMICO PARA DETERMINAR LA VIABILIDAD DE LA TECNOLOGÍA DE SOLIDIFICACIÓN DE AZUFRE"		UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	
PLANTA DE ENCAPSULADO DE AZUFRE						FECHAS				FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES EN INGENIERÍA QUÍMICA	
PLANO DE LOCALIZACIÓN GENERAL DE EQUIPO						FECHAS		MÉXICO		REV. A	
LUGAR: CD. MEXICO, TAMP.						MÉXICO		ESC: 1/500		(D): No. AZUFRE-PLG	

En la siguiente imagen, la parte sombreada es la ubicación de la Planta de encapsulado de azufre en la Refinería de Madero, en este plano se puede apreciar que estará situada a un costado de la unidad U-080 esta última será la que suministre la materia prima y los servicios auxiliares también serán tomados de los racks de esta.



3.9. LISTA DE PREDIMENSIONAMIENTO DE EQUIPO, INSTALACIONES Y MATERIALES

3.9.1 PAQUETE DE ENCAPSULADO DE AZUFRE

Clave de Equipo	Descripción	Capacidad MTPA	Altura m	Ancho m	Longitud m	Peso kg
PAQ-01	<p>El paquete de encapsulado de azufre incluye:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sistema de formación de pastillas ROTOFORM • Banda transportadora (desde el equipo ROTOFORM a la tolva) • Tolva de almacenamiento • Estructura de llenado de sacos • Sistema de control • Instrumentación 	50	1.9	2.2	14	6,000

3.9.2 BOMBAS

El predimensionamiento de las bombas se realizó a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach con la cual se puede determinar el diferencial de presión. Para considerar la caída de presión por accesorios se utilizan métodos cortos con base en heurística, la cual indica que para diámetros iguales o menores a 150 mm se debe considerar un porcentaje adicional del 20% de la longitud de tramo recto.

Para calcular la potencia hidráulica se calcula por medio de la siguiente formula:

$$H_p = \frac{Q\Delta P}{1715}$$

y para el cálculo de la potencia al freno se divide la potencia hidráulica entre la eficiencia.

LISTA DE BOMBAS						
Clave de equipo	Servicio	Flujo másico kg/h	Tipo de bomba	Potencia de accionador Hp	Presión de succión kg/cm ²	Presión de descarga kg/cm ²
GA-01A	Bomba de azufre líquido	6,000	Vertical	1/2	0	2
GA-01B	Bomba de azufre líquido	6,000	Vertical	1/2	0	2
GA-02A	Bomba de enfriamiento	18,192	Vertical	1/2	1	3.5
GA-02B	Bomba de enfriamiento	18,192	Vertical	1/2	1	3.5

3.9.3 AEROENFRIADOR

Para realizar el predimensionamiento del aerofriador, se parte de los coeficientes totales de transferencia de calor requeridos (U) y se determinan por la ecuación de Fourier cuando se conoce carga térmica (Q), área (A) y diferencial de temperatura (ΔT). El coeficiente convectivo (h) se calcula con la Ley de Enfriamiento de Newton. La separación de los tubos se determinó por los valores relativos del coeficiente de transferencia de calor interior y del lado del aire

Se utilizó un simulador comercial para determinar el ancho y largo de la bahía y la potencia de los ventiladores.

AEROENFRIADOR								
Clave de equipo	Servicio	Área del tubo desnudo m ²	Área extendida m ²	Ancho de bahía m	Largo de la bahía m	Material del tubo	Ventiladores por bahía	Potencia kW
EC-01	Enfriador de azufre líquido	2.82	6.43	1.2	1.2	Acero al carbono	1	1.5

3.9.4 TUBERÍAS

Se dimensionaron las tuberías de acuerdo con un algoritmo en el cual se debe calcular el factor de fricción, para ello se utiliza la ecuación de Goudar–Sonnad, la información para realizar los cálculos es: flujo masico (W) [=] lb/h, densidad (ρ) [=] lb/ft³, viscosidad (μ) [=] cP, rugosidad (ϵ) [=] ft y se supone una velocidad (no mayor a 10 ft/s) [=] ft/s.

Las tablas ASME B36.10 se usan para determinar el espesor de la tubería a partir del diámetro y cedula. Es importante mencionar que las tuberías irán en rack por medio de un puente el cual tiene una elevación de siete metros y las tuberías EC-S-100 y PAQ- S-101 llevan trazas eléctricas debido a la NOM-009.

LINEAS DE TUBERIA							
Numeración de línea	Origen- Destino	Estado Físico	Diámetro mm	Longitud m	Espesor mm	Material	Cedula
EC-S-100	De la fosa al aerofriador	Líquido	50	112.5	5.54	Acero al carbono	80 XS
PAQ-S-101	Del aerofriador al ROTOFORM	Líquido	50	5	5.54	Acero al carbono	80 XS
PAQ-VB-102	De rack de tuberías a planta de encapsulado	Gas	50	120.6	3.91	Acero al carbono	40 STD
PAQ-AE-103	De rack de tuberías a planta de encapsulado	Líquido	80	120.6	5.49	Acero al carbono	40 STD
DA-AE-104	De planta de encapsulado a rack de tuberías	Líquido	80	124.7	5.49	Acero al carbono	40 STD
PAQ-IA-105	De rack de tuberías a planta de encapsulado	Gas	25	120.6	3.38	Acero al carbono	40 STD

3.9.5 ALMACEN

Para realizar el dimensionamiento de la nave de almacenamiento se toma en consideración que el tiempo de residencia del producto sea de siete días y el espacio para que pueda desplazarse un montacargas.

Para el cálculo del almacén se tomó en cuenta que los super sacos tendrían las siguientes dimensiones: 90x90x120 cm y en cada uno se puede almacenar como máximo dos toneladas. Con las dimensiones de los super sacos y si el azufre encapsulado se apila en dos filas; se estima que en un área de 204 m² podrían almacenarse 1,000 toneladas de azufre encapsulado y en el resto del área se puede desplazar el montacargas.

EDIFICIOS					
Edificio	Descripción	Capacidad Toneladas	Área m ²	Ancho m	Largo m
ALM-01	Almacén de azufre encapsulado	1,008	324	18	18

3.9.6 MONTACARGAS

Se hizo la selección del montacargas en base a la capacidad de producción por día que tiene el Paquete de encapsulado de azufre y el espacio de la nave de almacenamiento.

MONTACARGAS						
Tipo de montacargas	Cantidad	Capacidad de carga Toneladas	Ancho m	Altura m	Largo m	Velocidad de desplazamiento km/h
WomKlift	2	3.5	1.21	2.43	4.7	19

3.10. REQUERIMIENTOS DE SERVICIOS AUXILIARES

Los requerimientos de servicios auxiliares reportados por el proveedor SANDVIK para el Paquete de encapsulado de azufre son los siguientes:^[29]

A. VAPOR

Condiciones de Vapor de Baja Presión en límites de batería			
Flujo de operación, TPD	1.63		
Flujo de puesta en marcha, TPD	3.26		
Condiciones	Min.	Nor.	Máx.
Presión, kg/cm ² m.		3.5	
Temperatura, °C		148	
Calidad	Saturado		

B. AGUA DE ENFRIAMIENTO

Condiciones de suministro dentro de límites de batería			
Flujo de agua, m ³ /h	18.19		
	Min.	Nor.	Máx.
Presión, kg/cm ² man.	1.4	1.5	1.75
Temperatura, °C	28	32	35
Disponibilidad	La requerida		
Condiciones de retorno dentro de límites de batería			
	Min.	Nor.	Máx.
Presión, kg/cm ² man.		1.0	
Temperatura, °C		36	

C. AIRE

Condiciones en el cabezal de distribución	
Presión, kg/cm ² man.	7.0/4.5 mín
Temperatura °C	Ambiente, 40 máx
Temperatura de rocío, °C, mín/nor/máx	-32/-20/-10
Consumo	Mínimo
Humedad	Seco
Impurezas (aceite, etc)	Ninguna

D. ENERGÍA ELÉCTRICA

	Cantidad	HP/h	kWh
Paquete de encapsulado:			
Unidad de Rotoform	1	3.0	2.2
Enfriador de correa	1	3.0	2.2
Extractor de aire	1	5.0	3.7
Motor de bomba de agua	2	1	0.75
Motor de bomba de azufre	2	1	0.75
Motor de ventilador	1	2	1.5
Total:		15	11.1

CAPÍTULO IV. ESTUDIO ECONÓMICO

El estudio económico se realiza con base a los resultados del estudio de mercado y el estudio técnico, con lo cual a su vez se desarrollarán los presupuestos de inversión, de costos y gastos, que serán presentados en forma sistematizada en estados financieros proforma.

El estudio económico consta de dos secciones la primera consiste en realizar el Estimado de Costos de Inversión Clase V y la segunda corresponde al desarrollo de un estudio de perfil técnico económico (evaluación económica).

4.1. ESTIMADO DE COSTO DE INVERSIÓN CLASE V

El presupuesto de inversión (Estimados de Costo de Inversión) están integrados por el conjunto de erogaciones que es necesario realizar para conformar la infraestructura física e intangible que le permitirá al proyecto transformar un conjunto de insumos en un producto determinado y está integrado por:^[30]

I. INVERSIÓN FIJA

Está formada por todos aquellos bienes tangibles que es necesario adquirir inicialmente y durante la vida útil del proyecto, para cumplir con las funciones de producción, comercialización y distribución de los productos a obtener. Los principales rubros que lo integran son:

- Maquinaria y equipo principal
- Equipo auxiliar o complementario
- Equipo de transporte y manejo de carga
- Mobiliario de oficina y equipo de comunicación
- Instalaciones complementarias
- Terreno
- Servicios auxiliares
- Edificios u obra civil
- Contingencias

II. INVERSIÓN DIFERIDA

La inversión diferida se integra con todas las erogaciones para llevar a cabo la inversión del proyecto, desde el surgimiento de la idea hasta su ejecución y puesta en marcha. Entre los conceptos principales se encuentra:

- Pagos por estudios de preinversión
- Constitución y manifestación de la sociedad
- Gastos preoperativos de arranque
- Gastos financieros preoperativos
- Asesoría y supervisión
- Patentes y marcas
- Capacitación del personal
- Estudios

Para preparar un Estimado de Costo de Inversión de una planta química y/o de proceso existen cinco métodos, la exactitud de los estimados se incrementa del método 1 al 5, requiriendo también de un mayor detalle de información y tiempo para realizarlo conforme se avanza en los métodos.

- Costo por unidad de producto producido. Asume una relación lineal entre los costos de la planta y su capacidad. Este método es aplicable únicamente cuando se comparan plantas similares y teniendo capacidades dentro de un rango muy cercano a la capacidad de referencia, aproximadamente en un $\pm 30\%$.
- Curvas de capacidad o la regla del factor de las seis décimas. Este método de aproximación toma en cuenta los factores de escala. De acuerdo con la regla si el Costo de la planta A (con su respectiva Capacidad A) es conocido, entonces el Costo de una planta similar B puede ser aproximadamente determinado al multiplicar la relación de capacidades (n) elevada a la 0.6 por el costo de la planta de referencia, matemáticamente se representa de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Costo } B = \text{Costo } A \left(\frac{\text{Capacidad } B}{\text{Capacidad } A} \right)^n$$

Esta ecuación genera una curva logarítmica. Las curvas de costo/capacidad están disponibles para los procesos más comunes de hidrocarburos.

- Ajuste de costos de un proyecto ya conocido. Este es el mejor método para preparar un estimado preliminar (cuando los costos de una planta similar que recientemente ha sido terminada). Los costos existentes pueden ser ajustados de una forma general o bien detallada y así utilizarse en alguno de los otros métodos. Cuando se trabaja sobre un nuevo estimado a partir de los costos existentes se procede a identificar las principales diferencias entre el propuesto para la planta y el precio de la planta. Las correcciones se hacen también sobre los costos de escalación.
- Estimado de los equipos principales y factores de materiales y servicios. Es el método más exacto para determinar un estimado preliminar para una nueva planta, sin disponer de los costos actuales de la planta. En este punto se diseñan los equipos, determinando su capacidad y tamaño. Los equipos son estimados individualmente y los otros costos son determinados en función de los costos de los equipos. Este método es un estimado importante para el propietario y para la compañía que lo realice.
- Estimado detallado a partir de las entradas y salidas de los diagramas de flujo y sus especificaciones. Este método deja de ser una simple estimación y se convierte en la determinación de un costo real de la inversión de la planta, por lo cual se requiere que la ingeniería lleve un avance considerable, para así determinar las dimensiones finales de los equipos, adicionalmente se tiene que cuantificar todos los materiales tales como tubería, eléctrico, pintura, aislamiento, instrumentación, civil, datos que serán provistos de los diagramas de instrumentación y líneas, diagrama de flujo de proceso, planos eléctricos, entre otros. Adicionalmente se debe incluir un estimado de horas hombre que también se cuantificara en costo.^[30]

Para el Caso de Estudio, es decir para determinar la inversión de la Planta de encapsulado de azufre, se inició con el costo más significativo, es decir, del Paquete de encapsulado de azufre y se optó por el método de la regla del factor de las seis décimas, de donde se conoce la siguiente información:

Capacidad A	5.5	TPD
Capacidad B	5.7	TPD
Costo A	\$1,320,000	USD del 2004

- El Costo A y la Capacidad A se obtuvieron de una cotización del año 2004 del proveedor SANDVIK.
- La Capacidad del Caso de Estudio del Paquete de encapsulado es de 5.7 TPD
- Para hacer la escalación del Paquete de encapsulado de azufre se considera $n=0.6$

$$\text{Costo B} = \$1,320,000 \left(\frac{5.7}{5.5} \right)^{0.6} = \$1,348,594 \text{ USD para el año 2004}$$

- Para actualizar el Costo B a 2020 se utilizan los Índices de Chemical Engineering.

$$\text{Indice} = \frac{\text{Indice requerido (diciembre 2020)}}{\text{Indice de referencia (diciembre 2004)}}$$

$$\text{Indice} = \frac{737.3}{538.9}$$

- El costo del Paquete de encapsulado de azufre para el año 2020 es de \$1,845,100.00 USD.

Para realizar el cálculo de los costos de los equipos de proceso adicionales de la Planta de encapsulado de azufre, así como los materiales de construcción y la instalación de estos (los cuales son mencionados en el capítulo cuatro), se utilizó un simulador comercial para determinar los costos de inversión de plantas industriales, el cual, en base a las características y especificaciones de los equipos, genera los modelos volumétricos para la instalación de estos.

El simulador estima:

- Las Horas Hombres y costos que se requieren para instalar los equipos de proceso
- Las cantidades y costos de materiales de construcción (asociados a cada familia de equipo de proceso,³), tales como: tubería, civil, instrumentos, eléctrico.
- Las Horas Hombres y costos que se requieren para instalar los materiales de construcción

³ Ejemplo: Hornos, reactores, columnas, intercambiadores de calor, bombas, etc.

- Los costos asociados a la maquinaria y equipo de construcción

En las tablas 4.1 y 4.2 se muestran los costos de suministro e instalación de equipos y materiales de construcción que se requiere para que la Planta de encapsulado de azufre pueda ser operada

Una vez obtenido los costos de cada uno de los equipos de proceso, los materiales de construcción y la maquinaria y equipo de construcción se procede a calcular los costos directos complementarios, así como los activos diferidos⁴, considerando los siguientes factores estadísticos para plantas industriales.^[33]

- Fletes, gastos de aduana, seguros, maniobras y refaccionamiento, para el cálculo de este costo se considera el 5% de los costos directos.
- Pruebas y puesta en marcha, para el cálculo de este costo se considera el 4% de los costos directos.
- Factor de sobre costo, el cálculo de este se determina por un factor del 32.6% sobre los costos directos totales e incluye (indirectos, financiamiento y utilidad).
- Ingeniería, para el cálculo de este costo se utiliza un factor el cual es el 4% del Subtotal 1. (Ver tabla 5.3)
- Administración del proyecto, este se obtiene con el 5% del Subtotal 2. (Ver tabla 5.3)
- Contingencia, este se determina con el 15% del Subtotal 3. (Ver tabla 5.3)
[34]

En la tabla 4.3 se muestra el Estimado de Costo de Inversión Clase V para la Planta de encapsulado de azufre con capacidad de 50 MTPA.

⁴ Activos diferidos: son aquellos gastos pagados por anticipado, por lo que se tiene derecho a recibir un servicio. [35]

TABLA 4.1
COSTOS DE LOS EQUIPOS, MATERIALES, EDIFICIO Y MONTACARGAS

Costo de equipo		Tubería	Civil	Instrumentos	Eléctrico	Aislamiento	Pintura
PAQ-01	\$1,845,100						
GA-01AB	\$51,400	\$6,724	\$582	\$567	\$3,087		\$996
GA-02AB	\$50,600	\$16,487	\$624	\$567	\$3,087		\$1002
EC-01	\$34,100	\$14,180		\$5,453	\$1,543	\$3,753	\$376
EC-S-100		\$600					\$534
PAQ-S-101		\$281					\$24
PAQ-VB-102		\$3,516					\$572
PAQ-AE-103		\$7,233					\$572
DA-AE-104		\$7,457					\$592
PAQ-IA-105		\$3,575					\$572
ALM-01			\$314,551				
WOMKLIFT	\$59,919						
TOTALES	2,041,119	\$60,053	\$315,757	\$6,587	\$7,717	\$3,753	\$5,240

Nota: Valores en USD

TABLA 4.2
COSTOS DE INSTALACIÓN DE EQUIPOS, MATERIALES Y EDIFICIO

Costo de equipo		Tubería	Civil	Instrumentos	Eléctrico	Aislamiento	Pintura
PAQ-01	\$41,788						
GA-01AB	\$41,788	\$10,058	\$1,224	\$155	\$3,441		\$1,882
GA-02AB	\$1,232	\$10,038	\$1,276	\$155	\$3,441		\$1,561
EC-01	\$5,215	\$8,591		\$3,306	\$1,720	\$2,711	\$738
EC-S-100		\$5,291					\$584
PAQ-S-101		\$279					\$26
PAQ-VB-102		\$4,464					\$626
PAQ-AE-103		\$6,340					\$513
DA-AE-104		\$6,502					\$531
PAQ-IA-105		\$6,052					\$626
ALM-01			\$172,203				
TOTALES	\$90,023	\$57,615	\$174,703	\$3,616	\$8,602	\$2,711	\$7,087

Nota: Valores en USD

TABLA 4.3
INVERSIÓN TOTAL

PROYECTO	
Estudio de perfil técnico-económico para determinar la viabilidad de la tecnología de solidificación de azufre	
PAQUETE	CAPACIDAD
Paquete de encapsulado de azufre	50 MTPA
Estimado de Inversión Clase V (-30% +50%)	
Descripción	Costo
Equipo	\$2,090,500
Tubería	\$125,800
Concreto	\$625,000
Acero	\$287,000
Instrumentos	\$281,500
Eléctrico	\$603,300
Aislamiento	\$6,500
Pintura	\$33,500
Costos Directos	\$4,053,100
Fletes, Gastos de aduana, Seguros, Maniobras y Refaccionamiento	\$202,700
Maquinaria y equipo de construcción	\$483,300
Pruebas y puesta en marcha	\$162,100
Costo Directo Total	\$4,901,200
Factor de sobre costo	\$1,597,800
Subtotal 1	\$6,499,000
Ingeniería	\$260,000
Subtotal 2	\$6,759,000
Administración del proyecto	\$338,000
Subtotal 3	\$7,097,000
Contingencia	\$1,064,600
INVERSION TOTAL	\$8,161,600

Nota: Valores en USD

4.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA A NIVEL PERFIL

El siguiente paso por realizar, es el estudio de perfil o evaluación económica, con el cual se determinará si el Caso de Estudio presenta tendencia de viabilidad para implementarse.⁵

El estudio de la evaluación económica es la parte final de todo el análisis de la viabilidad de un proyecto, en este punto se sabe que hay un mercado potencial atractivo. Sin embargo, aún no se ha demostrado que la inversión propuesta será económicamente rentable.^[36]

Todas las cifras monetarias que se obtuvieron en el análisis o estudio económico del proyecto, ahora se deben transformar a un índice de rentabilidad económica. Las cifras para calcular estos índices de rentabilidad son la inversión inicial, la depreciación, los flujos netos de efectivo y algunos datos del financiamiento.^[30]

Es importante mencionar que antes de iniciar la evaluación económica, es imprescindible fijar las bases sobre las cuales se realizará el cálculo de rentabilidad, estas bases son denominadas premisas económicas. A continuación, se enlistan las premisas económicas que se utilizan para la evaluación económica de la Planta de encapsulado de azufre con capacidad de 50 MTPA en la Refinería de Ciudad Madero, Tamaulipas.

1. *Horizonte de planeación del proyecto:* es la duración del proyecto (años) en su etapa preoperativa y operativa.
 - *Etapas preoperativa:* Se define desde el momento de adjudicación del contrato hasta la fecha de recepción de los trabajos, las partes que le componen son las etapas de estudios, construcción y cierre.
 - *Etapas operativa:* Se define desde la fecha de recepción de los trabajos y los años en que fiscalmente se considere el tiempo de vida de los equipos e instalaciones de la planta, para proyectos del sector público debe considerarse 15 años como mínimo.^[37]

⁵ Estudio de perfil: se realiza con base a ingeniería conceptual y se desarrolla Estimado de Costo de Inversión Clase V y una evaluación económica, cuyos indicadores económicos sólo señalan la tendencia de viabilidad económica del proyecto de inversión.

Estudio de pre-factibilidad: se realiza con base a ingeniería básica y se desarrolla Estimado de Costo de Inversión Clase IV y una evaluación económica, cuyos indicadores económicos se utilizan tanto para seleccionar la mejor alternativa de entre varias, así como para realizar el apartado presupuestal del proyecto de inversión.

Estudio de factibilidad: se realiza con base a ingeniería FEED y se desarrolla Estimado de Costo de Inversión Clase III y una evaluación económica, cuyos indicadores económicos muestran el orden de magnitud de la generación de valor del proyecto de inversión.

-
2. *Establecer la moneda en la que se realizará el estudio y el tipo de cambio:* La moneda que se utiliza es en dólares y el tipo de cambio es de 21.9 pesos/dólares. ^[38]
 3. *Tasa de descuento y/o interés:* En el cálculo del valor presente neto se debe utilizar la tasa de descuento para proyectos del sector público es de 10%. ^[37]
 4. *Pago de impuestos*
 - i) Impuesto Sobre la Renta: se debe de descontar un 30% sobre la Utilidad Bruta. ^[39]
 - ii) Depreciación: se debe considerar lineal sobre el monto total de inversión de los activos fijos sobre el monto de activos fijos con excepción del terreno. ^[39]
 5. *Curva de aprendizaje:* en este caso no será considerada, por ser un sistema de baja complejidad y con pleno conocimiento de su operación.
 6. *Factor de operación de la planta:* son los días al año en que la planta opera continuamente sin parar, para este proyecto se considera un factor de 0.96 que equivale a operar 350 días al año.
 7. Para el precio del azufre encapsulado se tomó un promedio de los precios de los mercados potenciales el cual es de \$100 USD, de acuerdo con la U.S. Geological Survey.
 8. El precio de la materia prima y los servicios auxiliares es tomado de los precios de resultados de operación 2020-2035 Pemex Transformación Industrial.
 9. Mantenimiento, el cálculo de este costo se estima como el 3% de la inversión total. ^[30]
 10. Fijos directos, este se obtiene de la suma de los costos de administración, mano de obra directa y supervisión técnica por un factor de 45%. ^[30]
 11. Seguros e impuestos sobre la propiedad, para el cálculo de este costo se estima como el 2.3% la inversión total. ^[30]

I. PRESUPUESTO DE OPERACIÓN

Se forma a partir de los ingresos y egresos de operación, su objetivo es pronosticar un estimado de las entradas y salidas monetarias de la empresa, durante uno o varios periodos, mismos que están en relación directa con la vida útil de proyecto. Su elaboración debe estar fundamentada en los resultados y/o conclusiones obtenidas en el estudio de mercado y en el estudio técnico.

A. PRESUPUESTO DE INGRESO

Contiene volumen, precio y valor de las ventas, tanto para el producto principal como para los subproductos obtenidos. La integración de este presupuesto se estructura de la siguiente manera:

Descripción	Unidad	Unidades Día operación	Unidades Año	$\frac{U.S.\$}{Unidad}$	$\frac{U.S.\$}{Año}$
Producto Subproducto ₁ Subproducto ₂			(1)		
(1) Utilizar el factor de servicio de la planta					

En donde los volúmenes de productos y subproductos deben analizarse y multiplicarse por sus respectivos precios para obtener los ingresos totales anuales.

Es importante tener en cuenta que los precios de los productos estén alineados con las unidades en que se reporten los volúmenes de producción. Con respecto al precio de los productos se recomienda que para fines de prefactibilidad se utilicen precios constantes durante todo el horizonte de planeación del proyecto.

II. PRESUPUESTO DE EGRESOS

A. COSTOS DIRECTOS

Son aquellos que están directamente involucrados en la elaboración y venta del producto final, por ello varían en proporción directa al volumen de producción. Son la parte del costo que se aplica directamente a la producción de bienes. Los principales rubros que lo componen son:

- Materia (s) Prima (s)
- Mano de obra de operación y supervisión
- Servicios Auxiliares
- Sustancias Químicas
- Catalizadores
- Mantenimiento Correctivo
- Suministro de Operación
- Regalías

Los costos directos se obtienen, para cada periodo, de acuerdo con la siguiente ecuación⁶:

$$\begin{aligned}
 & \textit{Costos Directos} \\
 & = \textit{Costos materia} + \textit{Costos de servicios auxiliares} \\
 & + \textit{Costo de catalizadores y sustancias químicas} \qquad \qquad \qquad (\textit{ec. 1})
 \end{aligned}$$

B. COSTOS INDIRECTOS

Son aquellos que se generan como consecuencia de la operación de la empresa, indirectamente del volumen de producción de la planta. Los principales rubros que lo componen son:

- Materiales indirectos: repuestos de máquinas, útiles de aseo, combustibles y lubricantes, etc.
- Mano de obra indirecta: técnicos, empleados, supervisores, etc.
- Gastos indirectos: rentas, mantenimiento preventivo, ventas, etc.

$$\begin{aligned}
 & \textit{Costos indirectos} \\
 & = \textit{Costos de operación} + \textit{Gastos fijos} \qquad \qquad \qquad (\textit{ec. 2})
 \end{aligned}$$

C. COSTOS DE PRODUCCIÓN

Los costos de producción son todas las erogaciones que están directamente relacionadas con la producción y se obtienen:

$$\begin{aligned}
 & \textit{Costos de producción} \\
 & = \textit{Costos directos} + \textit{Costos indirectos} \qquad \qquad \qquad (\textit{ec. 3})
 \end{aligned}$$

⁶ Para este Caso de Estudios no aplica el costo de catalizadores y sustancias químicas.

D. DEPRECIACIÓN Y AMORTIZACIÓN

La tasa de depreciación a considerar es la resultante del inverso de número de años de la etapa operativa del proyecto (n), la depreciación se realiza sobre los activos fijos con excepción del terreno y la amortización se realiza sobre los activos diferidos.

Depreciación y amortización

$$= \text{Monto total de la Procura del contrato de obra} * \left(\frac{l}{n}\right) \quad (\text{ec. 4})$$

E. COSTOS FINANCIEROS

Tiene relación con la organización de la empresa que habrá de apoyar su materialización, la forma de aportación del capital determinará en parte el financiamiento y también la estructura social de la empresa.

El estudio del financiamiento del proyecto debe incluir:

- Análisis de las fuentes de recursos económicos.
- Los mecanismos para conseguir dichos recursos.
- Los requisitos que son necesarios para obtener los recursos previstos de las fuentes consideradas y su viabilidad.
- Información proveniente de las instituciones de crédito que señalen la disponibilidad de recursos económicos para el proyecto.

Utilidad antes de impuestos

$$\begin{aligned} &= \text{Presupuesto de ingresos} - \text{Costos de producción} \\ &\quad - \text{Depreciación y amortización} \\ &\quad - \text{Costos financieros} \end{aligned} \quad (\text{ec. 5})$$

III. ESTADOS FINANCIEROS PROFORMA

Son el producto sintético y final del proceso de registrar la forma exacta, sistemática y cronológica de todas las operaciones de una entidad económica. Tienen como objetivo pronosticar un panorama futuro del proyecto y se elaboran a partir de los presupuestos estimados de cada uno de los rubros que intervienen desde la ejecución del proyecto hasta su operación. Los estimados financieros proforma más representativos para el proyecto son:

- Estado de Resultados
- Flujo Netos de Efectivo

Las bases para la elaboración de los Estados Financieros Proforma son:

1. Elaboración del programa de inversión total, es decir la inversión fija, diferida y capital de trabajo.
2. Determinación de la estructura financiera del proyecto.
3. Determinación de las fuentes y condiciones del financiamiento.
4. Estimación de los ingresos y egresos del proyecto.

A. ESTADO DE RESULTADOS

Su finalidad es mostrar los resultados económicos de la operación prevista del proyecto para los periodos subsecuentes. Se elaboran efectuando la suma algebraica de los ingresos menos los egresos estimados. Tienen gran importancia para los directores de la empresa, ya que informa sobre las actividades fundamentales de cualquier entidad económica, tales como los ingresos derivados de bienes o servicios, el costo de estos, los gastos necesarios para su distribución y de los servicios generales como personal, contabilidad etc. durante un periodo específico.

$$\begin{aligned}
 & \textit{Utilidad Despues de impuestos} \\
 & = \textit{Utilidad Antes de Impuestos} - \textit{Impuestos Sobre la Renta} \\
 & - \textit{Reparto de Utilidades} \qquad \qquad \qquad (ec. 8)
 \end{aligned}$$

a) IMPUESTO SOBRE LA RENTA

El monto de los impuestos sobre el concepto de Utilidad Antes de Impuestos para cada año se obtiene de la siguiente forma.

$$\begin{aligned}
 & \textit{Impuesto Sobre la Renta} \\
 & = \frac{\textit{Tasa impositiva}}{100} * \textit{Utilidad Antes de Impuestos} \quad (ec. 6)
 \end{aligned}$$

Se debe aplicar una tasa impositiva del 30% de impuesto sobre la utilidad bruta, cuando esta sea positiva, y del 2% sobre el monto de la procura, cuando no lo sea.

b) REPARTO DE UTILIDADES

El monto del reparto de utilidades para cada año se obtiene de la siguiente forma.

Reparto de utilidades

= *Porcentaje de utilidades*

* *Utilidad Antes de Impuestos* (ec 7)

Se debe aplicar un porcentaje de utilidades del 10% sobre la utilidad bruta. No habrá reparto de utilidades cuando la utilidad bruta sea negativa.⁷

B. FLUJO NETO DE EFECTIVO

Es el flujo de efectivo correcto para medir el valor de un proyecto o una empresa, ya que muestra el flujo generado que se encuentra disponible para todos los proveedores de capital, tanto acreedores como accionistas.

Flujo Neto de Efectivo

= *Utilidad Después de Impuestos + Depreciación y amortización*

– *Inversión Inicial* (ec. 9)

IV. CÁLCULO DE INDICADORES ECONÓMICOS

El responsable de la evaluación o la toma de decisiones necesita disponer de información sobre el proyecto o asunto a evaluar y los resultados de la medición que se lleva a cabo. Cuando más fidedigna, válida y precisa sea la información disponible, mayor será la probabilidad de obtener los parámetros, los fines y los medios del proyecto en estudio.

La evaluación sobre un sistema de información que permite opinar en relación con el rendimiento, la racionalidad y la eficiencia en la asignación de inversiones, así como acerca de los efectos que provocan los factores mencionados.

Con referencia al ciclo de vida del proyecto, la evaluación debe entenderse como la explotación sistemática de la eficiencia de las distintas etapas del proyecto. En general se puede afirmar que el proyecto será evaluado como eficiente si va logrando los fines previstos para los cuales fue creado, en tal forma que optimice la relación ente los medios de que se dispone y sus fines. ^[40]

La forma de cuantificar todo lo antes expuesto es mediante el cálculo de indicadores económicos, los cuales en su conjunto señalarán en forma práctica si el proyecto obtendrá pérdidas o ganancias, a continuación, se describen los indicadores más relevantes para la toma de decisiones:

⁷ Para el Caso de Estudio no se consideran reparto de actividades pues es proyecto del sector público.

A. Valor Presente Neto (VPN)

Es uno de los criterios económicos más ampliamente utilizado en la evaluación de proyectos de inversión. Consiste en determinar la equivalencia en el tiempo cero de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comprobar si el proyecto representa un incremento en la riqueza de la empresa. Matemáticamente el VPN se puede expresar de la siguiente manera:

$$VPN = -F_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t}$$

Donde:

F_t = Flujo de efectivo en el periodo t

n= Número de periodos de la vida del proyecto

i= Tasa de descuento

t= subíndice de tiempo (periodo evaluado)

B. Tasa Interna de Retorno (TIR)

Es la tasa de actualización que iguala el valor presente neto de los ingresos totales con el valor presente de los egresos totales de un proyecto en estudio.

$$VPN = 0 = -F_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t}$$

Como se aprecia es un proceso iterativo en donde la ecuación debe igualarse con cero, se sugiere que la primera iteración se realice con la tasa de descuento.

C. Índice de Rentabilidad (IR)

Es la relación entre el VPN y el valor presente de la inversión, y su significado es cuantas unidades monetarias se obtienen por cada unidad monetaria invertida.

$$\text{Índice de Rentabilidad} = \frac{VPN}{\text{Inversión Total}}$$

D. Periodo de Recuperación de la Inversión con flujos descontados (PRI)

Consiste en establecer un periodo máximo para recuperar las inversiones. El criterio de decisión es aceptar aquellos proyectos cuya recuperación se realiza en un periodo menor al máximo establecido.

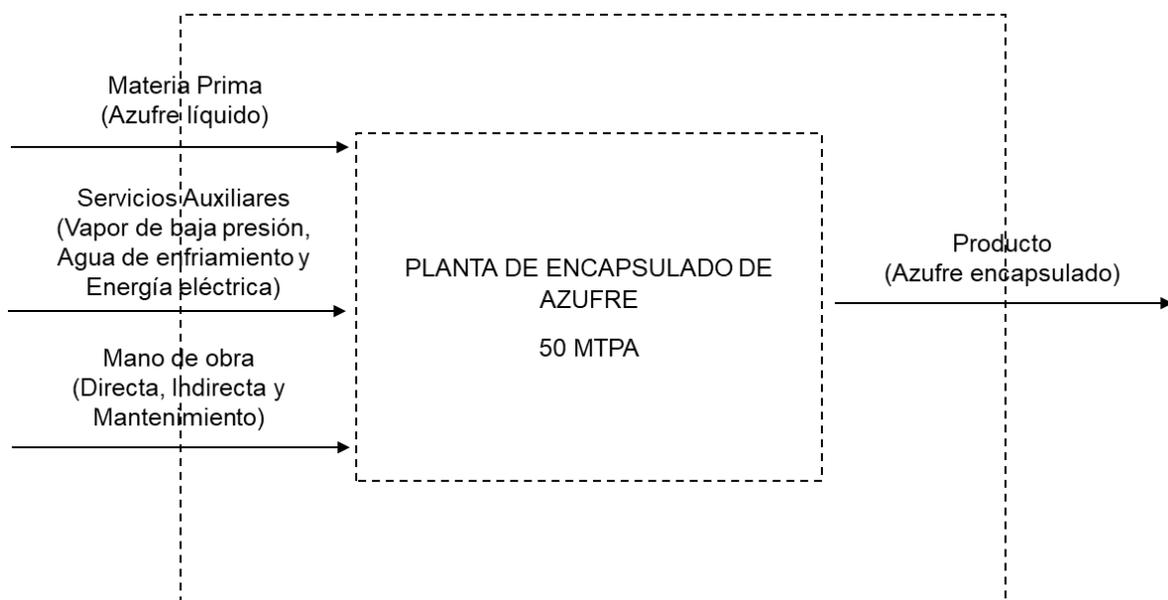
E. Análisis de sensibilidad

Generalmente existe un elemento de incertidumbre asociado a las alternativas estudiadas de ahí que los tomadores de decisiones rara vez se conforman con los resultados simples de un análisis. Les interesa un rango completo de posibles resultados que pueden ocurrir como consecuencia de variaciones en las estimaciones de los parámetros del proyecto. Los análisis de sensibilidad más comunes es el verificar la variación que tiene los indicadores económicos al variar: el monto de inversión, el periodo de construcción de la planta, la variación en el precio de las materias primas y productos entre otros.

4.3. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL CASO DE ESTUDIO

A continuación, se presenta la evaluación económica para el Caso de Estudio: Planta de encapsulado de azufre con capacidad de 50 MTPA, en la Refinería “Francisco I. Madero”, en Ciudad Madero, Tamaulipas, a fin de obtener los indicadores económicos para conocer la tendencia de viabilidad de la implementación de esta.

Previo a a evaluación económica se formuló el proyecto de inversión, en donde se identifican todos los costos y beneficios asociados a la operación de la Planta de encapsulado de azufre, mostrándose los mismos en el siguiente esquema de entradas y salidas.



I. PRESUPUESTO DE INVERSIÓN

A. INVERSIÓN FIJA + INVERSIÓN DIFERIDA

La inversión estimada para el proyecto es de \$8,161,600 millones de dólares para una capacidad de 50 MTPA.

II. PRESUPUESTO DE OPERACIÓN

A. PRESUPUESTO DE INGRESOS

Descripción	Unidad	Unidad/ Año	USD/ Unidad	USD/ Año
Azufre encapsulado	Ton	47,935	\$100	\$4,793,472
				\$4,793,472

AZUFRE ENCAPSULADO				
Año	Unidad	Unidad/ Año	USD/ Unidad	USD/ Año
2023	TON	47,935	\$100	\$4,793,472
2024	TON	47,935	\$100	\$4,793,472
2025	TON	47,935	\$100	\$4,793,472
2026	TON	47,935	\$100	\$4,793,472
2027	TON	47,935	\$100	\$4,793,472
2028	TON	47,935	\$100	\$4,793,472
2029	TON	47,935	\$100	\$4,793,472
2030	TON	47,935	\$100	\$4,793,472
2031	TON	47,935	\$100	\$4,793,472
2032	TON	47,935	\$100	\$4,793,472
2033	TON	47,935	\$100	\$4,793,472
2034	TON	47,935	\$100	\$4,793,472
2035	TON	47,935	\$100	\$4,793,472
2036	TON	47,935	\$100	\$4,793,472
2037	TON	47,935	\$100	\$4,793,472

III. PRESUPUESTO DE EGRESOS

A. COSTOS DIRECTOS

$$\text{Costos directos} = \text{Costo materia prima} + \text{Costo de servicios auxiliares} \quad (\text{ec.1})$$

Materias Primas

Descripción	Unidad	Unidad/ Año	USD/ Unidad	USD/ Año
Azufre líquido	TON	47,935	\$9	\$431,415
				\$431,415

AZUFRE LÍQUIDO				
Año	Unidad	Unidades/ Año	USD/ Unidad	USD/ Año
2023	TON	47,935	\$9	\$431,412
2024	TON	47,935	\$8	\$383,478
2025	TON	47,935	\$7	\$335,543
2026	TON	47,935	\$7	\$335,543
2027	TON	47,935	\$6	\$287,608
2028	TON	47,935	\$5	\$239,674
2029	TON	47,935	\$5	\$239,674
2030	TON	47,935	\$5	\$239,674
2031	TON	47,935	\$5	\$239,674
2032	TON	47,935	\$5	\$239,674
2033	TON	47,935	\$5	\$239,674
2034	TON	47,935	\$5	\$239,674
2035	TON	47,935	\$5	\$239,674
2036	TON	47,935	\$5	\$239,674
2037	TON	47,935	\$5	\$239,674

Servicios Auxiliares

Descripción	Unidad	Unidad/ Año	USD/ Unidad	USD/ Año
Agua de enfriamiento	M ³	151,373	\$0.088	\$13,321
Vapor de baja presión	TON	571.85	\$22	\$12,581
Energía eléctrica	MWh	93.35	\$62	\$5,788
				\$31,690

AGUA DE ENFRIAMIENTO					
Año	Unidad	Unidades/ Hora	Unidades/ Año	USD/ Unidad	USD/ Año
2023	M ³	18	151,373	\$0.088	\$13,321
2024	M ³	18	151,373	\$0.088	\$13,321
2025	M ³	18	151,373	\$0.088	\$13,321
2026	M ³	18	151,373	\$0.088	\$13,321
2027	M ³	18	151,373	\$0.088	\$13,321
2028	M ³	18	151,373	\$0.088	\$13,321
2029	M ³	18	151,373	\$0.088	\$13,321
2030	M ³	18	151,373	\$0.088	\$13,321
2031	M ³	18	151,373	\$0.088	\$13,321
2032	M ³	18	151,373	\$0.088	\$13,321
2033	M ³	18	151,373	\$0.088	\$13,321
2034	M ³	18	151,373	\$0.088	\$13,321
2035	M ³	18	151,373	\$0.088	\$13,321
2036	M ³	18	151,373	\$0.088	\$13,321
2037	M ³	18	151,373	\$0.088	\$13,321

VAPOR DE BAJA PRESIÓN					
Año	Unidad	Unidades/ Hora	Unidades/ Año	USD/ Unidad	USD/ Año
2023	TON	0.068	571.85	\$22	\$12,581
2024	TON	0.068	571.85	\$23	\$13,153
2025	TON	0.068	571.85	\$23	\$13,153
2026	TON	0.068	571.85	\$23	\$13,153
2027	TON	0.068	571.85	\$23	\$13,153
2028	TON	0.068	571.85	\$24	\$13,724
2029	TON	0.068	571.85	\$24	\$13,724
2030	TON	0.068	571.85	\$24	\$13,724
2031	TON	0.068	571.85	\$25	\$14,296
2032	TON	0.068	571.85	\$25	\$14,296
2033	TON	0.068	571.85	\$25	\$14,296
2034	TON	0.068	571.85	\$25	\$14,296
2035	TON	0.068	571.85	\$25	\$14,296
2036	TON	0.068	571.85	\$25	\$14,296
2037	TON	0.068	571.85	\$25	\$14,296

ENERGÍA ELÉCTRICA					
Año	Unidad	Unidades/ Hora	Unidades/ Año	USD/ Unidad	USD Año
2023	MWh	0.0111	93.35	\$62	\$5,788
2024	MWh	0.0111	93.35	\$65	\$6,068
2025	MWh	0.0111	93.35	\$66	\$6,161
2026	MWh	0.0111	93.35	\$67	\$6,254
2027	MWh	0.0111	93.35	\$67	\$6,254
2028	MWh	0.0111	93.35	\$69	\$6,441
2029	MWh	0.0111	93.35	\$70	\$6,535
2030	MWh	0.0111	93.35	\$70	\$6,535
2031	MWh	0.0111	93.35	\$72	\$6,721
2032	MWh	0.0111	93.35	\$73	\$6,815
2033	MWh	0.0111	93.35	\$73	\$6,815
2034	MWh	0.0111	93.35	\$73	\$6,815
2035	MWh	0.0111	93.35	\$73	\$6,815
2036	MWh	0.0111	93.35	\$73	\$6,815
2037	MWh	0.0111	93.35	\$73	\$6,815

B. COSTOS INDIRECTOS

$$\text{Costos indirectos} = \text{Costos de operación} + \text{Gastos fijos} \quad (\text{ec.2})$$

Administración

Descripción	Cantidad	\$ Año	Total \$/ Año
Superintendente	0.125	\$1,013,975	\$126,747
		M.N.	\$126,747
		U.S.	\$5,788

Mano de obra directa

Descripción	Cantidad	\$/ Año	Total \$/ Año
Encargado "A" plantas	1	\$390,435	\$390,435
Operador especialista de plantas	3	\$367,773	\$1,103,319
Operador de 2ª plantas	6	\$342,033	\$2,052,198
Ayudante especialista de operación plantas	1	\$285,830	\$285,830
Secretaria de 4ª	0.250	\$260,829	\$65,207
		M.N.	\$3,896,989
		U.S.	\$177,945

Supervisión técnica

Descripción	Cantidad	\$ Año	Total \$/ Año
Jefe de sector operación	0.250	\$1,013,975	\$253,494
Jefe de sector mantenimiento	0.250	\$1,013,975	\$253,494
Coordinador de operaciones	0.125	\$1,013,975	\$126,747
Coordinador de mantenimiento	0.125	\$1,013,975	\$126,747
Ing. de mantenimiento mecánico	0.250	\$784,090	\$196,022
Ing. de mantenimiento plantas	0.250	\$784,090	\$196,022
Ing. de mantenimiento eléctrico	0.250	\$784,090	\$196,022
Ing. de inspección y seguridad	0.250	\$784,090	\$196,022
Ing. de mantenimiento instrumentación	0.250	\$784,090	\$196,022
		M.N.	\$1,740,592
		U.S.	\$79,479

C. COSTOS DE PRODUCCIÓN

Costos de Producción = Costos directos + Costos indirectos

Concepto	Año 1 2023	Año 2 2024	Año 3 2025	Año 4 2026	Año 5 2027	Año 6 2028	Año 7 2029	Año 8 2030
1) Costos Directos	\$463,102	\$416,019	\$368,177	\$368,271	\$320,336	\$273,160	\$273,253	\$273,253
Materias Primas	\$431,412	\$383,478	\$335,543	\$335,543	\$287,608	\$239,674	\$239,674	\$239,674
Servicios Auxiliares	\$31,689	\$32,541	\$32,634	\$32,728	\$32,728	\$33,486	\$33,580	\$33,580
2) Costos de Operación	\$508,060	\$508,060	\$508,060	\$508,060	\$508,060	\$508,060	\$508,060	\$508,060
Administración	\$5,788	\$5,788	\$5,788	\$5,788	\$5,788	\$5,788	\$5,788	\$5,788
Operación (Mano de obra directa)	\$177,945	\$177,945	\$177,945	\$177,945	\$177,945	\$177,945	\$177,945	\$177,945
Supervisión Técnica	\$79,479	\$79,479	\$79,479	\$79,479	\$79,479	\$79,479	\$79,479	\$79,479
Mantenimiento (Material y mano de obra)	\$244,848	\$244,848	\$244,848	\$244,848	\$244,848	\$244,848	\$244,848	\$244,848
3) Gastos Fijos	\$636,401	\$636,401	\$636,401	\$636,401	\$636,401	\$636,401	\$636,401	\$636,401
Generales	\$330,239	\$330,239	\$330,239	\$330,239	\$330,239	\$330,239	\$330,239	\$330,239
Fijos directos	\$118,445	\$118,445	\$118,445	\$118,445	\$118,445	\$118,445	\$118,445	\$118,445
Seguros, impuestos sobre la propiedad	\$187,717	\$187,717	\$187,717	\$187,717	\$187,717	\$187,717	\$187,717	\$187,717
4) Costo Total en Efectivo de Producción	\$1,607,562	\$1,560,479	\$1,512,638	\$1,512,731	\$1,464,796	\$1,417,620	\$1,417,714	\$1,417,714
5) Depreciación	\$544,107	\$544,107	\$544,107	\$544,107	\$544,107	\$544,107	\$544,107	\$544,107
Costos financieros*								
Costo Total de Producción	\$2,151,669	\$2,104,586	\$2,056,744	\$2,056,838	\$2,008,903	\$1,961,727	\$1,961,820	\$1,961,820

*No se considera financiamiento

Nota: Valores en USD

Costos de Producción (Continuación)

Concepto	Año 9 2031	Año 10 2032	Año 11 2033	Año 12 2034	Año 13 2035	Año 14 2036	Año 15 2037
1) Costos Directos	\$274,012	\$274,105	\$274,105	\$274,105	\$274,105	\$274,105	\$274,105
Materias Primas	\$239,674	\$239,674	\$239,674	\$239,674	\$239,674	\$239,674	\$239,674
Servicios Auxiliares	\$34,338	\$34,431	\$34,431	\$34,431	\$34,431	\$34,431	\$34,431
2) Costos de Operación	\$508,060	\$508,060	\$508,060	\$508,060	\$508,060	\$508,060	\$508,060
Administración	\$5,788	\$5,788	\$5,788	\$5,788	\$5,788	\$5,788	\$5,788
Operación (Mano de obra directa)	\$177,945	\$177,945	\$177,945	\$177,945	\$177,945	\$177,945	\$177,945
Supervisión Técnica	\$79,479	\$79,479	\$79,479	\$79,479	\$79,479	\$79,479	\$79,479
Mantenimiento (Material y mano de obra)	\$244,848	\$244,848	\$244,848	\$244,848	\$244,848	\$244,848	\$244,848
3) Gastos Fijos	\$636,401	\$636,401	\$636,401	\$636,401	\$636,401	\$636,401	\$636,401
Generales	\$330,239	\$330,239	\$330,239	\$330,239	\$330,239	\$330,239	\$330,239
Fijos directos	\$118,445	\$118,445	\$118,445	\$118,445	\$118,445	\$118,445	\$118,445
Seguros, impuestos sobre la propiedad	\$187,717	\$187,717	\$187,717	\$187,717	\$187,717	\$187,717	\$187,717
4) Costo Total en Efectivo de Producción	\$1,418,472	\$1,418,565	\$1,418,565	\$1,418,565	\$1,418,565	\$1,418,565	\$1,418,565
5) Depreciación	\$544,107	\$544,107	\$544,107	\$544,107	\$544,107	\$544,107	\$544,107
Costos financieros*							
Costo Total de Producción	\$1,962,579	\$1,962,672	\$1,962,672	\$1,962,672	\$1,962,672	\$1,962,672	\$1,962,672

*No se considera financiamiento

Nota: Valores en US

IV. ESTADO FINANCIERO PROFORMA

A. ESTADO DE RESULTADOS

Concepto	Año 1 2023	Año 2 2024	Año 3 2025	Año 4 2026	Año 5 2027	Año 6 2028	Año 7 2029	Año 8 2030
Ingresos	\$4,793,472	\$4,793,472	\$4,793,472	\$4,793,472	\$4,793,472	\$4,793,472	\$4,793,472	\$4,793,472
Costo en efectivo de producción	\$1,607,562	\$1,560,479	\$1,512,638	\$1,512,731	\$1,464,796	\$1,417,620	\$1,417,714	\$1,417,714
Utilidad de operación	\$3,185,910	\$3,232,993	\$3,280,834	\$3,280,741	\$3,328,676	\$3,375,852	\$3,375,758	\$3,375,758
Depreciación y amortización	\$544,107	\$544,107	\$544,107	\$544,107	\$544,107	\$544,107	\$544,107	\$544,107
Gastos financieros								
Utilidad antes de impuestos	\$2,641,803	\$2,688,886	\$2,736,728	\$2,736,634	\$2,784,569	\$2,831,745	\$2,831,652	\$2,831,652
I.S.R.	\$792,541	\$806,666	\$821,018	\$ 820,990	\$ 835,371	\$ 849,524	\$ 849,496	\$ 849,496
Flujo Neto de Efectivo Después de Impuestos	\$2,393,369	\$2,426,327	\$2,459,816	\$2,459,751	\$2,493,305	\$2,526,328	\$2,526,263	\$2,526,263

Nota: Valores en USD

ESTADO DE RESULTADOS (CONTINUACIÓN)

Concepto	Año 9 2031	Año 10 2032	Año 11 2033	Año 12 2034	Año 13 2035	Año 14 2036	Año 15 2037
Ingresos	\$4,793,472	\$4,793,472	\$4,793,472	\$4,793,472	\$4,793,472	\$4,793,472	\$4,793,472
Costo en efectivo de producción	\$ 1,418,472	\$1,418,565	\$1,418,565	\$1,418,565	\$1,418,565	\$1,418,565	\$1,418,565
Utilidad de operación	\$3,375,000	\$3,374,907	\$3,374,907	\$3,374,907	\$3,374,907	\$3,374,907	\$3,374,907
Depreciación y amortización	\$544,107	\$544,107	\$544,107	\$544,107	\$544,107	\$544,107	\$544,107
Gastos financieros							
Utilidad antes de impuestos	\$2,830,893	\$2,830,800	\$2,830,800	\$2,830,800	\$2,830,800	\$2,830,800	\$2,830,800
I.S.R.	\$ 849,268	\$ 849,240	\$ 849,240	\$ 849,240	\$ 849,240	\$ 849,240	\$ 849,240
Flujo Neto de Efectivo Después de Impuestos	\$2,525,732	\$2,525,667	\$2,525,667	\$2,525,667	\$2,525,667	\$2,525,667	\$2,525,667

Nota: Valores en USD

B. FLUJO NETO DE EFECTIVO

Año	Ingreso	Costo Total en Efectivo de Producción	I.S.R.	Flujo de Efectivo (después de impuestos)
2023	\$4,793,472	\$1,607,562	\$792,541	\$2,393,369
2024	\$4,793,472	\$1,560,479	\$806,666	\$2,426,327
2025	\$4,793,472	\$1,512,638	\$821,018	\$2,459,816
2026	\$4,793,472	\$1,512,731	\$820,990	\$2,459,751
2027	\$4,793,472	\$1,464,796	\$835,371	\$2,493,305
2028	\$4,793,472	\$1,417,620	\$849,524	\$2,526,328
2029	\$4,793,472	\$1,417,714	\$849,496	\$2,526,263
2030	\$4,793,472	\$1,417,714	\$849,496	\$2,526,263
2031	\$4,793,472	\$1,418,472	\$849,268	\$2,525,732
2032	\$4,793,472	\$1,418,565	\$849,240	\$2,525,667
2033	\$4,793,472	\$1,418,565	\$849,240	\$2,525,667
2034	\$4,793,472	\$1,418,565	\$849,240	\$2,525,667
2035	\$4,793,472	\$1,418,565	\$849,240	\$2,525,667
2036	\$4,793,472	\$1,418,565	\$849,240	\$2,525,667
2037	\$4,793,472	\$1,418,565	\$849,240	\$2,525,667

Nota: Valores en USD

V. CÁLCULO DE INDICADORES ECONÓMICOS

Inicio del Proyecto	01-ene-2022
Periodo de Construcción	12 meses
Inicio de Operaciones	01-ene-2023
Horizonte del Proyecto	15 años
Tasa de Interés Anual	10%

A. Valor Presente Neto (VPN)

$$\begin{aligned}
 VPN = & -\frac{8,161,600}{(1+0.1)^0} + \frac{2,393,369}{(1+0.1)^1} + \frac{2,426,327}{(1+0.1)^2} + \frac{2,459,816}{(1+0.1)^3} + \frac{2,459,751}{(1+0.1)^4} \\
 & + \frac{2,493,305}{(1+0.1)^5} + \frac{2,526,328}{(1+0.1)^6} + \frac{2,526,263}{(1+0.1)^7} + \frac{2,526,263}{(1+0.1)^8} + \frac{2,525,732}{(1+0.1)^9} \\
 & + \frac{2,525,667}{(1+0.1)^{10}} + \frac{2,525,667}{(1+0.1)^{11}} + \frac{2,525,667}{(1+0.1)^{12}} + \frac{2,525,667}{(1+0.1)^{13}} \\
 & + \frac{2,525,667}{(1+0.1)^{14}} + \frac{2,525,667}{(1+0.1)^{15}}
 \end{aligned}$$

$$VPN = \$10,732,847 \text{ USD}$$

B. Tasa Interna de Retorno (TIR)

$$\begin{aligned}
 10,732,847 = & -\frac{8,161,600}{(1 + TIR)^0} + \frac{2,393,369}{(1 + TIR)^1} + \frac{2,426,327}{(1 + TIR)^2} + \frac{2,459,816}{(1 + TIR)^3} \\
 & + \frac{2,459,751}{(1 + TIR)^4} + \frac{2,493,305}{(1 + TIR)^5} + \frac{2,526,328}{(1 + TIR)^6} + \frac{2,526,263}{(1 + TIR)^7} \\
 & + \frac{2,526,263}{(1 + TIR)^8} + \frac{2,525,732}{(1 + TIR)^9} + \frac{2,525,667}{(1 + TIR)^{10}} + \frac{2,525,667}{(1 + TIR)^{11}} \\
 & + \frac{2,525,667}{(1 + TIR)^{12}} + \frac{2,525,667}{(1 + TIR)^{13}} + \frac{2,525,667}{(1 + TIR)^{14}} + \frac{2,525,667}{(1 + TIR)^{15}}
 \end{aligned}$$

$$TIR = 29.50\%$$

C. Índice de Rentabilidad (IR)

$$IR = \frac{10,732,847}{8,161,600}$$

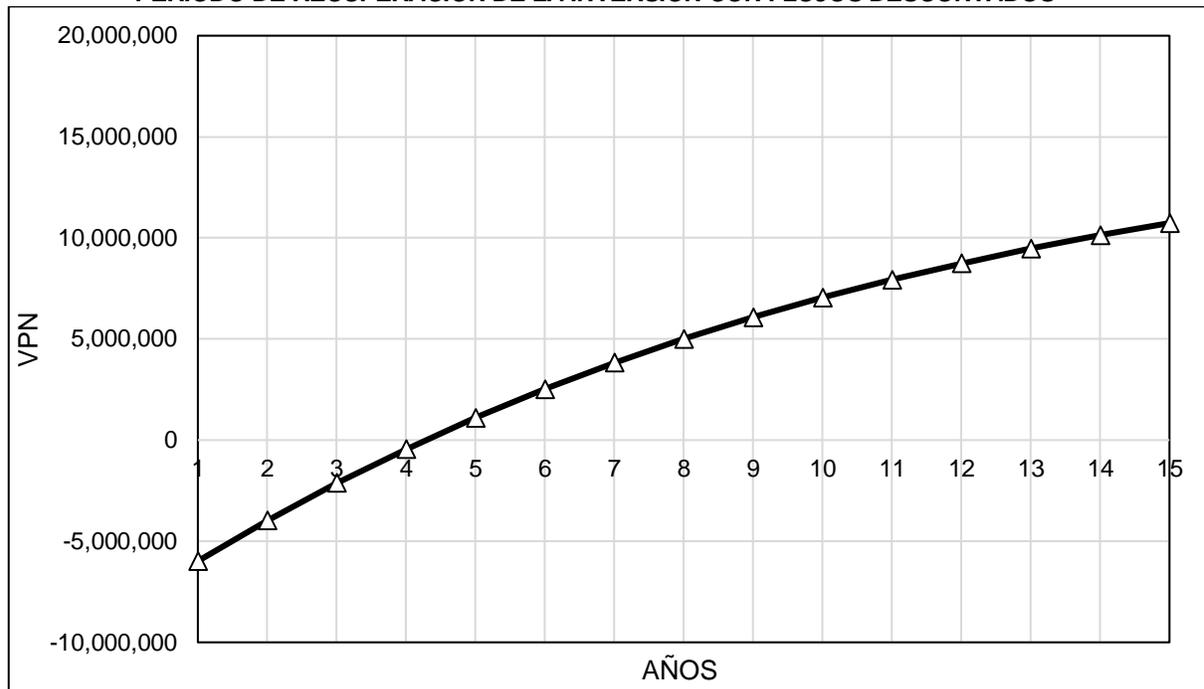
$$IR = 1.32$$

D. Periodo de Recuperación de la Inversión con flujos descontados (PRI)

	Año 0 2022	Año 1 2023	Año 2 2024	Año 3 2025	Año 4 2026	Año 5 2027	Año 6 2028	Año 7 2029
Flujos descontados	(8,161,600)	2,175,790	2,005,229	1,848,096	1,680,043	1,548,146	1,426,046	1,296,372
Flujos descontados acumulados		2,175,790	4,181,019	6,029,115	7,709,158	9,257,304	10,683,350	11,979,723
VPN		(5,985,810)	(3,980,581)	(2,132,485)	(452,442)	1,095,704	2,521,750	3,818,123

	Año 8 2030	Año 9 2031	Año 10 2032	Año 11 2033	Año 12 2034	Año 13 2035	Año 14 2036	Año 15 2037
Flujos descontados	1,178,520	1,071,157	973,754	885,231	804,755	731,596	665,087	604,625
Flujos descontados acumulados	13,158,243	14,229,400	15,203,154	16,088,384	16,893,140	17,624,735	18,289,822	18,894,447
VPN	4,996,643	6,067,800	7,041,554	7,926,784	8,731,540	9,463,135	10,128,222	10,732,847

GRAFICA 4.1
PERIODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN CON FLUJOS DESCONTADOS



A continuación, se muestra una tabla resumida con los valores de los indicadores económicos calculados.

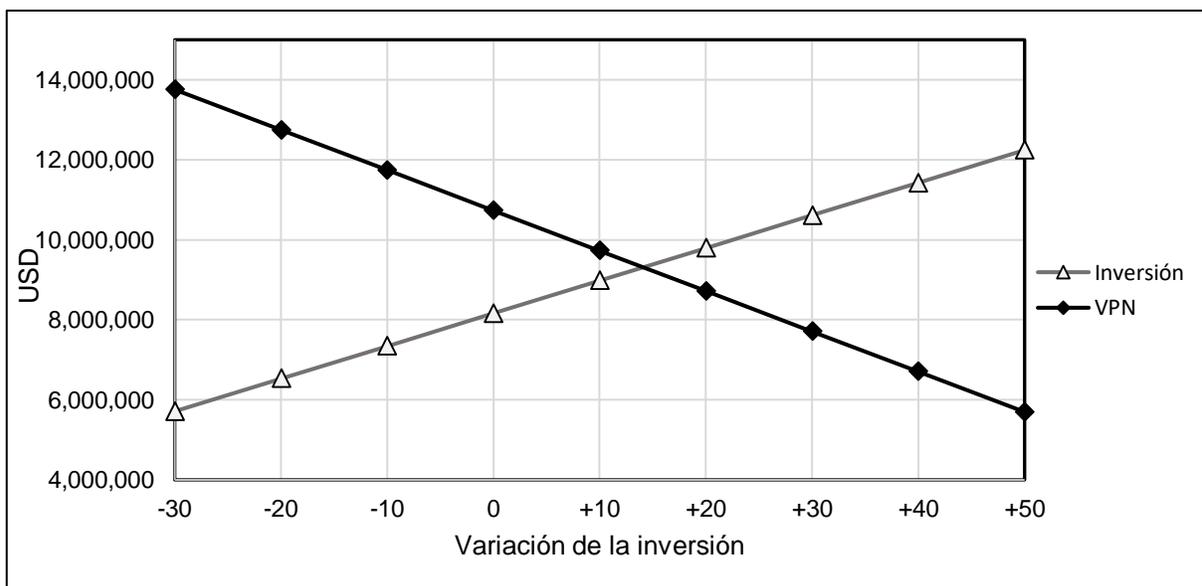
Inversión Total	8,161,600	USD\$
Valor Presente Neto	10,732,847	USD\$
Tasa Interna de Retorno	29.50%	
Índice de Rentabilidad	1.32	
Periodo de Recuperación de la Inversión	4 años, 3 meses	

E. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

a. INVERSIÓN

PORCENTAJE DE LA VARIACIÓN DE INVERSIÓN	INVERSIÓN USD	VPN USD	PRI AÑOS, MESES	TIR %
+50%	12,242,401	5,697,601	7,11	17.46
+40%	11,426,241	6,704,650	7	19.27
+30%	10,610,081	7,711,699	6,3	21.31
+20%	9,793,921	8,718,748	5,6	23.63
+10%	8,977,760	9,725,798	5	26.33
0%	8,161,600	10,732,847	4,3	29.50
-10%	7,345,440	11,739,896	3,10	33.30
-20%	6,529,280	12,746,945	3,3	37.99
-30%	5,713,120	13,753,994	2,9	43.93

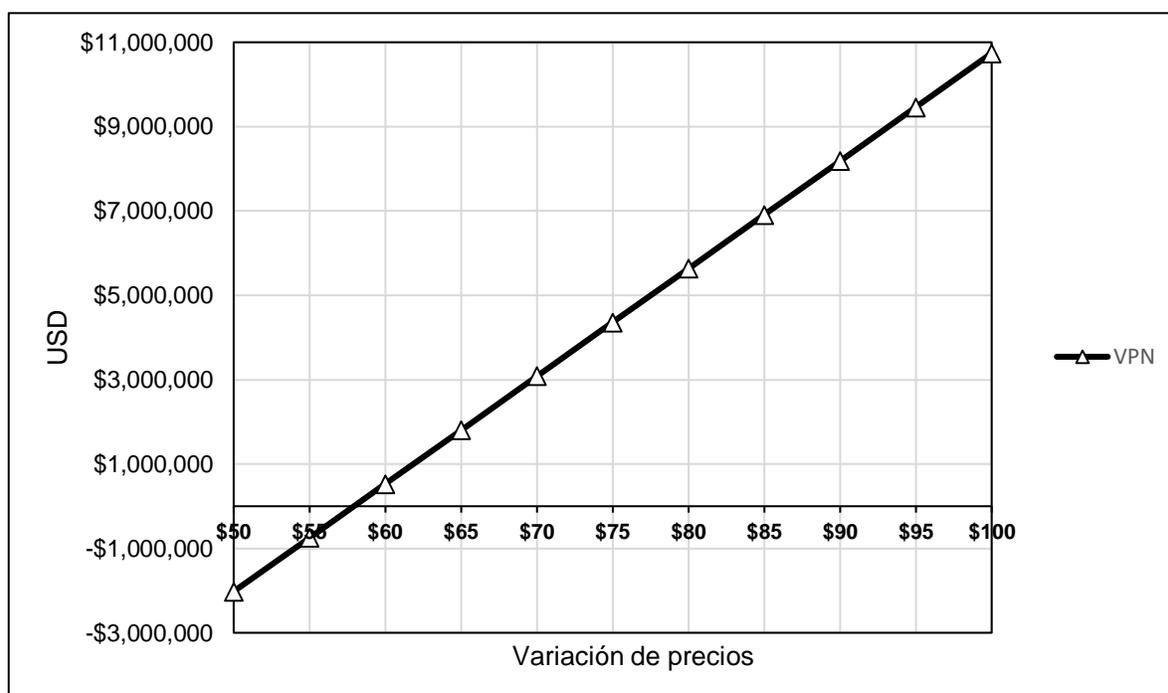
GRAFICA 4.2
ANALISIS SENSIBILIDAD SOBRE MONTO DE INVERSION



b. PRECIO DE AZUFRE ENCAPSULADO

PRECIO	INVERSIÓN USD	VPN USD	PRI AÑOS, MESES	TIR %
\$50	\$8,161,600	-\$2,027,988	No se recupera	5.50
\$55	\$8,161,600	-\$751,905	No se recupera	8.40
\$60	\$8,161,600	\$524,179	13,4	11.08
\$65	\$8,161,600	\$1,800,262	10,5	13.63
\$70	\$8,161,600	\$3,076,346	8,6	16.07
\$75	\$8,161,600	\$4,352,429	7,4	18.42
\$80	\$8,161,600	\$5,628,513	6,5	20.72
\$85	\$8,161,600	\$6,904,596	5,8	22.96
\$90	\$8,161,600	\$8,180,680	5,1	25.17
\$95	\$8,161,600	\$9,456,763	4,9	27.35
\$100	\$8,161,600	\$10,732,847	4,3	29.50

GRAFICA 4.3
ANALISIS SENSIBILIDAD SOBRE VARIACIÓN DE PRECIOS



CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El estudio de mercado de azufre en México determinó que históricamente la oferta ha sido mayor que la demanda en el periodo de quince años (2005-2017), lo que implicó que existía un excedente de azufre en el país del orden de 480 MTPA en 2017. Por otro lado, en las proyecciones que se realizaron tanto en un escenario pesimista como en un escenario optimista se puede apreciar que el excedente de azufre en los siguientes ocho años aumentará debido a los proyectos que tiene previstos PEMEX, y a la dinámica de oferta-demanda nacional, se prevé que el excedente pueda ir de 455 a 755 MTPA.

Adicionalmente, el estudio de mercado indica que existe un amplio diferencial entre el precio del azufre líquido producido en México y los precios de los mercados internacionales del azufre encapsulado o granulado, alcanzando ordenes de 50-100 USD/TON.

Por otro lado, el estudio técnico se identifica y cuantifican todos los requerimientos técnicos para el manejo, procesamiento y logística del azufre sólido o encapsulado, partiendo del hecho que la tecnología de encapsulado o granulado está ampliamente establecida a nivel mundial por lo menos en las últimas tres décadas, y que hay tecnologías específicas en función de la capacidad de procesamiento, los servicios auxiliares disponibles y las características del tamaño final de las capsulas o gránulos de azufre.

Combinando los resultados de los estudios de mercado y técnico se concluye que la capacidad de la Planta de encapsulado de azufre es del orden de 50 MTPA con lo cual se podría procesar la totalidad de la producción de azufre de uno de los cuatro trenes de la U-080 (Planta de Recuperación de Azufre en la Refinería “Francisco I. Madero”, en Ciudad Madero, Tamaulipas) si es que estos llegasen a operar al 100% de su capacidad y de manera general esta capacidad podría modularizarse para cubrir las necesidades de otras refinerías del SNR, concluyendo que para el Caso de Estudio la tecnología de SANDVIK, Rotoform 3000 (la cual es un proceso de encapsulado con rotor y cinturón frío) es la idónea.

Como parte de ingeniería conceptual, el balance de materia y energía elaborado indica que para producir 50 MTPA de azufre encapsulado se requieren 50 MTPA de azufre líquido, corriente que debe acondicionarse (enfriarse), previo a su entrada al Paquete de encapsulado de azufre, en donde se producen las capsulas de azufre para su posterior almacenamiento, de las tres etapas mencionadas se procedió a especificar y/o pre-dimensionar los equipos y paquetes de proceso, las líneas de proceso y servicios auxiliares principales, y el sistema de almacenamiento, para lo cual se desarrolló un PLG preliminar en donde se estima que se requiere un área de aproximadamente 45 X 35 metros para albergar la infraestructura requerida para la Planta de encapsulado de azufre.

El desarrollo del estudio económico tuvo su interfase con el estudio técnico al formular el proyecto de inversión, es decir se identificaron todos los costos y beneficios por la implementación de este, de tal manera que se generaron todos los insumos para desarrollar tanto un Estimado de Costo de Inversión Clase V (+50% /-30%), así como una evaluación económica a nivel perfil

Con base en la ingeniería conceptual de los equipos y paquetes de proceso y de la infraestructura asociada para operar una Planta de encapsulado de azufre con capacidad de 50 MTPA se estima un monto de inversión de \$8.2 MMUSD y de acuerdo con las bases y premisas económicas se concluye que el Caso de Estudio, es decir, la “Planta de encapsulado de azufre en la Refinería de Ciudad Madero, Tamaulipas” tiene tendencia de viabilidad técnico económica al reportar los siguientes indicadores económicos VPN = \$10,732,847 USD, TIR = 29.50%, Índice de rentabilidad de \$1.32 USD y PRI = de 4 años, 3 meses.

Cabe aclarar, que la toma de decisiones se fortalece con los resultados de los análisis de sensibilidad, pues se estima que, aunque el monto de inversión fluctuara en cincuenta por ciento por arriba de la estimación original (\$12.2 MMUSD) la tendencia de viabilidad económica se mantendría positiva, es decir VPN = \$5.7 MMUSD USD, TIR = 17.47% y PRI = de 7 años, 11 meses.

Por otra parte, si el diferencial de precios entre la materia prima y el producto disminuyese hasta 58 USD/TON se llegaría al punto de equilibrio, es decir, no existirían ni pérdidas ni ganancias por implementar el proyecto de inversión, reportándose VPN = 0 USD, TIR = 10% y PRI = 15 años, no obstante que en la estadística de los últimos diez años no se ha reportado un valor tan bajo y en la prospectiva tampoco se vislumbra este escenario.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

El desarrollo de la presente tesis cumple con el alcance fijado mediante los objetivos preestablecidos, para lo cual se desarrollaron los estudios requeridos para determinar la viabilidad técnico- económica para la implementación de un proyecto de inversión y en específico para el Caso de Estudio de la tecnología de encapsulado de azufre en la Refinería “Francisco I. Madero”, en Ciudad Madero, Tamaulipas

En primer instancia con el estudio de mercado se constata que existe un nicho de mercado actual y futuro para implementar la tecnología de encapsulado o granulado de azufre en México y que el potencial de negocio existe por el diferencial de precios entre producto y materia prima, y aunado a lo anterior con la implementación del proyecto se contribuiría a poder facilitar y aumentar su comercialización en México, a la vez que se propiciaría una mejora significativa para su almacenamiento, y así poder reducir el excedente que se tiene en los Centros Procesadores de Gas, Refinerías y Complejos Petroquímicos ya que el almacenamiento en estos lugares no es el idóneo, debido a que la mayoría de excedente de azufre se encuentra en los patios de azufre a la intemperie, lo cual en algún momento puede ocasionar un accidente.

Por otro lado, con el estudio técnico conceptual se determinaron los requerimientos necesarios para que la Planta de encapsulado de azufre pueda operar y se concluye que no hay ningún impedimento para que esta Planta pueda operar dentro de la Refinería “Francisco I. Madero”, en Ciudad Madero, Tamaulipas.

Finalmente, al formular el proyecto de inversión se identificaron los costos y beneficios de implementar el proyecto de inversión y al desarrollar el Estimado de Costo de Inversión con la información que se obtuvo a partir de los indicadores económicos se puede afirmar que el Caso de Estudio es decir, la “Planta de encapsulado de azufre” tiene tendencia de viabilidad técnico económica.

En virtud de lo anterior se mencionan los aspectos relevantes de la implementación de la tecnología de encapsulado de azufre en México:

- Se puede obtener un beneficio monetario de este subproducto, debido a que el costo del azufre líquido es muy inferior al costo del azufre encapsulado.
- Los países con déficit de azufre prefieren el azufre encapsulado debido a que el costo y riesgo para transportarlo es menor.

- Dejaría de existir un gran excedente de azufre en las Refinerías y Centros Procesadores de Gas en México debido a que la venta de este producto sería mayor.
- Habría un beneficio en cuestiones ambientales, ya que el azufre sólido no estaría a la intemperie, lo cual es un problema ambiental y de seguridad.

Finalmente se menciona, que el presente estudio de perfil técnico económico documenta y posee los suficientes atributos para determinar un Caso de Estudio exitoso en esta etapa, el cual debería ser estudiado más a fondo, pues se tienen los elementos para desarrollar ingeniería básica y evaluaciones económicas a nivel de prefactibilidad con lo cual se constaten los resultados para posteriormente llevar a una realidad el proyecto de inversión.

REFERENCIAS

- [1] SEMARNAT. (11 de diciembre de 2016). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/protocolo-de-kioto-sobre-cambio-climatico?idiom=es>
- [2] *United Nations Climate Change*. (2020). Obtenido de <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/que-es-el-acuerdo-de-paris>
- [3] *Organización Marítima Internacional*. (marzo de 2020). Obtenido de <https://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Paginas/Sulphur-2020.aspx>
- [4] Gang, C. (30 de mayo de 2011). *Analysis of Sulfur Granulating Process*. Obtenido de <https://wenku.baidu.com/view/0e16c3cc05087632311212a6.html>
- [5] Fellbach, D. S. (Junio de 2008). *SANDVIK PROCESS SYSTEM*
- [6] *Nuroil*. (2014). Obtenido de <http://www.nuroil.com/sulphur.aspx>
- [7] *IPCO*. (agosto de 2019). Obtenido de <https://ipco.com/products/rotoform-granulation-systems/>
- [8] *TSI The Sulphur Institute*. (2020). Obtenido de <https://www.sulphurinstitute.org/about-sulphur/an-advantaged-element/>
- [9] *LENNTECH*. (2020). Obtenido de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/>
- [10] *educaplus.org*. (2020). Obtenido de http://www.educaplus.org/sp2002/4propiedades/4_16.html
- [11] *WIKIPEDIA*. (11 de octubre de 2020). Obtenido de https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfuric_acid
- [12] *WIKIPEDIA*. (18 de octubre de 2020). Obtenido de <http://en.wikipedia.org/wiki/Sulphur>
- [13] IMP. (2007). *ESTUDIO DE MERCADO DEL AZUFRE*. Ciudad de México.
- [14] *INEGI*. (2005-2018). Obtenido de Industria Minerometalúrgica: <https://www.inegi.org.mx/>
- [15] *PEMEX*. (2005-2018). Obtenido de <https://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Paginas/AnuarioEstadistico.aspx>
- [16] Mexicano, S. G. (2005-2017). *Anuario Estadístico de la Minería Mexicana*. Obtenido de <https://www.gob.mx/sgm/articulos/consulta-el-anuario-estadistico-de-la-mineria-mexicano>

-
- [17] YEARBOOK, U. G. (2005-2019). *USGS Mineral Commodity Specialist*. Obtenido de <https://www.usgs.gov/centers/nmic/sulfur-statistics-and-information>
- [18] Canadian Minerals Yearbook, 2018
- [19] British Sulphur Report, 2018
- [20] Pemex, Plan de negocios de Petróleos Mexicanos y sus Empresas Productivas Subsidiarias 2019-2023.
- [21] SENER, Descripción del programa de rehabilitaciones, 2018.
- [22] SENER. (2020). GOBIERNO DE MÉXICO. Obtenido de <https://www.gob.mx/refineriadosbocas>
- [23] Pemex, Incorporación de un tren de refinación en el CP Cangrejera, 2020.
- [24] Independent Commodity Intelligence Service. (2006). Obtenido de <https://www.icis.com/compliance/reports/world-sulphuric-acid-weekly-report/>
- [25] ZAFARAN. (2020). Obtenido de <http://www.zafaran.net>
- [26] SANDVIK. (2020). Obtenido de <http://www.smt.sandvik.com/sps>
- [27] ENERSUL. (2020). Obtenido de <http://www.enersul.com>
- [28] Sandvik Process Systems. (2015). SANDVIK. Obtenido de www.processsystems.sandvik.com
- [29] Coronado María Laura (septiembre 2004). Cotización de Sandvik Turn-Key Sulphur Systems.
- [30] Martínez, Eduardo (2005). METODOLOGÍA INTEGRAL PARA LA FORMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE LA INDUSTRIA QUÍMICA Y DE PROCESO EN EL MARCO DE LA SUSTENTABILIDAD.
- [31] (diciembre 2004). Chemical Engineering. Obtenido de <https://view.imirus.com/433/library>
- [32] Lozowski Dorothy (diciembre 2020). Chemical Engineering. Obtenido de <https://view.imirus.com/433/library>
- [33] Perry, Robert H. MANUAL DEL INGENIERO QUÍMICO. 6ta edición, McGraw-Hill
- [34] Max S., Peters (2003). PLANT DESIGN AND ECONOMICS FOR CHEMICAL ENGINEERS. Estados Unidos. McGraw-Hill
- [35] Universidad Autónoma Metropolitana (enero 2021). "Apuntes del curso la contabilidad: una herramienta para la toma de decisiones"

- [36] Baca Urbina, Gabriel, 2016, "Evaluación de Proyectos", México
- [37] Lineamientos para la elaboración y presentación de los análisis costo-beneficio de los programas y proyectos de inversión (SHCP). Obtenido de: <http://shcp.sse.gob.mx/index.html>
- [38] Criterios Generales de política económica para la iniciativa de ley de ingresos y el proyecto de presupuesto de egresos de la federación correspondientes al ejercicio fiscal 2021.
- [39] Lechuga Santillan E., 2020, "Fisco Agenda" Ediciones fiscales ISEF, S.A., México.

GLOSARIO

CPG	Centros Procesadores de Gas
EPS	Empresa Productiva Subsidiaria
EXPR	Exportaciones
FOB	Free On Board (Libre a Bordo)
IMPR	Importaciones
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
LPG	Gas Licuado de Petróleo
MBPD	Miles de Barriles por Día
MT	Mil Toneladas
MTPA	Miles de Toneladas Por Año
NP	No presenta
NRQ	No requiere
OFA	Otras Formas de Azufre
PEMEX	Petróleos Mexicanos
REF	Refinerías
SNR	Sistema Nacional de Refinación
TCMA	Tasa de Crecimiento Media Anual
TPD	Toneladas Por Día
TRI	Transformación Industrial