



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**EVALUACIÓN TÉCNICA DE LAS PRINCIPALES TECNOLOGÍAS PARA
EL CONTROL DE EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS
VOLÁTILES, DE UNA TERMINAL DE ALMACENAMIENTO Y
REPARTO DE HIDROCARBUROS.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

CIPRIANO LEÓN ARENAS



CDMX.

2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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: **Profesor: José Antonio Ortíz Ramírez.**

VOCAL: **Profesor: Leticia Lozano Ríos.**

SECRETARIO: **Profesor: José Agustín García Reynoso.**

1er. SUPLENTE: **Profesor: Gema Luz Andraca Ayala.**

2° SUPLENTE: **Profesor: Alejandra Mendoza Campos.**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: CONJUNTO D, EDIFICO DE INGENIERÍA QUÍMICA, CUBÍCULO 310.

ASESOR DEL TEMA:

M. en I. José Antonio Ortíz Ramírez.

SUSTENTANTE:

Cipriano León Arenas.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	2
3. Hipótesis	2
4. DESARROLLO	3
3.1 Antecedentes	3
3.2 Caso de estudio.....	5
3.2.1 Características de la terminal de almacenamiento y reparto de hidrocarburos. 5	
3.2.1.1 Definición de requerimientos específicos de la TAR	6
3.2.1.1.1 Filosofía de operación.....	6
3.2.1.1.2 Flexibilidad de operación.....	7
3.2.1.1.3 Condiciones y disponibilidad de sistemas y servicios auxiliares	7
3.2.1.1.4 Bases de diseño.	8
3.2.1.1.5 Requerimientos de seguridad.....	9
3.2.1.1.6 Requerimientos de capacitación	9
3.2.1.1.7 Requerimientos de refaccionamiento.....	9
3.2.1.1.8 Garantías	10
3.2.1.1.9 Requerimientos generales de control.....	10
3.2.1.1.10 Disponibilidad de instalaciones eléctricas	10
3.2.2 Cálculo de emisiones.....	10
3.2.2.1 Consideraciones	11
3.2.2.2 Metodología de cálculo.....	13
3.2.2.3 Resumen de emisiones	16
3.3 Descripción de las principales tecnologías disponibles en el mercado para el control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV).....	20
3.3.1 Descripción del proceso de Absorción – Adsorción.....	21
3.3.2 Descripción del proceso de Compresión Mecánica.....	24
3.3.3 Descripción del proceso de Condensación criogénica.....	26
3.3.4 Descripción del proceso a base de Membranas	29

3.3.4.1	Adsorción - membranas - absorción.....	30
3.3.4.2	Condensación por compresión mecánica-membrana.....	32
3.3.5	Descripción del proceso de Oxidación térmica.....	34
3.3.5.1	Oxidación térmica recuperativa.....	34
3.3.5.2	Oxidación térmica regenerativa.....	37
3.3.6	Oxidación catalítica.....	39
3.1.1.1	Biofiltración.....	41
3.2	Matriz comparativa de alternativas tecnológicas.....	43
3.2.1	Tratamiento de COV.....	44
3.2.2	Requerimientos operativos.....	45
3.2.3	Seguridad.....	48
3.2.4	Mantenimiento.....	50
3.2.5	Proveedores de la tecnología de tratamiento de COV.....	51
3.2.6	Ventajas y desventajas de cada tecnología para el tratamiento de COV.....	53
3.3	Criterios de evaluación.....	56
3.3.1	Listado de los criterios de evaluación de la terminal de almacenamiento y reparto.....	56
3.3.1.1	Criterios de generación de COV.....	57
3.3.1.2	Criterios de proceso.....	58
3.3.1.3	Criterios de seguridad.....	60
3.3.1.4	Criterios relacionados con el proveedor.....	60
3.3.1.5	Criterios de tratamiento de COV.....	62
3.3.1.6	Criterios relacionados con las necesidades específicas de la terminal.....	63
3.3.1.7	Otros criterios.....	63
3.3.1.8	Resumen de criterios de evaluación.....	64
3.4	Aplicación del modelo de evaluación de alternativas tecnológicas.....	66
3.4.1	Evaluación sencilla de cumplimiento o no cumplimiento.....	67
3.4.2	Ponderación de los requerimientos y especificaciones técnicas del proyecto.....	68
3.4.2.1	Matriz de evaluación de alternativas tecnológicas.....	69
3.4.2.2	Matriz criterio tecnología.....	75
3.4.2.3	Ponderación de los criterios de evaluación.....	79
3.4.2.3.1	Estimación de la ponderación objetiva.....	79
3.4.2.3.2	Estimación de la ponderación subjetiva.....	82

3.4.2.3.3	Cálculo de la ponderación definitiva.....	87
3.4.3	Evaluación y selección de las alternativas tecnológicas identificadas.....	89
3.4.4	Definición de la tecnología más adecuada para el control de emisiones de la TAR.	91
5.	CONCLUSIONES.....	93

I. Lista de tablas

Tabla 1)	Datos del sitio.	5
Tabla 2)	Productos manejados por la TAR en cada posición de llenado.....	6
Tabla 3)	Composición típica de Vapores de Gasolina.....	8
Tabla 4)	Factores de saturación para metodología de carga de autotanque.....	12
Tabla 5)	Propiedades físicas de algunos hidrocarburos.....	13
Tabla 6)	Estimación de emisiones generadas por carga de Gasolina Premium....	16
Tabla 7)	Estimación de emisiones generadas por carga de Gasolina Magna.....	17
Tabla 8)	Estimación de emisiones generadas por carga de Diésel.....	18
Tabla 9)	Estimación de emisiones generadas por carga de Turbosina	19
Tabla 10)	Tratamientos de COV de las distintas tecnologías de las tecnologías de tratamiento de COV.	44
Tabla 11)	Requerimientos de proceso de las tecnologías de tratamiento de COV.....	45
Tabla 12)	Servicios auxiliares y equipos de las tecnologías de tratamiento de COV.....	46
Tabla 13)	Grado de automatización, riesgos a la salud y riesgo de incendio en las tecnologías de tratamiento de COV.	48
Tabla 14)	Mantenimientos y tiempo de vida media de las tecnologías de tratamiento de COV.	50
Tabla 15)	Proveedores de la tecnologías para el tratamiento de COV.	51
Tabla 16)	Ventajas y Ventajas y desventajas de cada tecnología para el tratamiento de COV.	53
Tabla 17)	Asignación de parámetro comparativo para Criterios de emisión de COV a la atmosfera.	70
Tabla 18)	Asignación de parámetro comparativo para Criterios de Seguridad.....	70
Tabla 19)	Asignación de parámetro comparativo para Otros Criterios.	71
Tabla 20)	Matriz comparativa de Criterios de emisión de COV a la atmosfera.....	71
Tabla 21)	Matriz comparativa de Criterios de proceso.	72
Tabla 22)	Matriz comparativa de Criterios de seguridad.	72
Tabla 23)	Matriz comparativa de Criterios relacionados con el proveedor.....	73

Tabla 24) Matriz comparativa de Criterios de tratamiento de COV.....	73
Tabla 25) Matriz comparativa de Criterios relacionados con las necesidades específicas de la terminal.....	74
Tabla 26) Matriz comparativa de Otros criterios.....	74
Tabla 27) Matriz criterio - tecnología de los Criterios de emisión de COV a la atmosfera.....	76
Tabla 28) Matriz criterio - tecnología de los Criterios de proceso.....	76
Tabla 29) Matriz criterio - tecnología de los Criterios de seguridad.....	77
Tabla 30) Matriz criterio - tecnología de los Criterios relacionados con el proveedor.....	77
Tabla 31) Matriz criterio - tecnología de los Criterios de tratamiento de COV.....	78
Tabla 32) Matriz criterio - tecnología de los Criterios de tratamiento de COV.....	78
Tabla 33) Matriz criterio - tecnología de Otros criterios.....	79
Tabla 34) Ponderación objetiva de cada criterio.	81
Tabla 35) Ejemplo de comparación criterio – criterio.....	83
Tabla 36) Matriz criterio – criterio.....	84
Tabla 37) Peso subjetivo de cada criterio.	86
Tabla 38) Ponderación de los criterios de evaluación.....	88
Tabla 39) Sumas ponderadas.	90
Tabla 40) Matriz de calificación de alternativas tecnológicas para el tratamiento de COV.....	91

II. Lista de figuras

Figura 1. Proceso de Adsorción – absorción.	23
Figura 2. Proceso de Condensación – Compresión.	25
Figura 3. Proceso de Condensación criogénica.	28
Figura 4. Proceso de Absorción – Membrana.....	31
Figura 5. Proceso de Compresión Mecánica - Membrana.....	33
Figura 6. Proceso de Oxidación térmica recuperativa.....	36
Figura 7. Proceso de Oxidación térmica recuperativa.....	38
Figura 8. Proceso de Oxidación catalítica.....	40
Figura 9. Proceso Biofiltración.....	42

III. Glosario

Adsorción: La adsorción es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material.

Absorción: Es la operación unitaria que consiste en la separación de uno o más componentes de una mezcla gaseosa con la ayuda de un solvente líquido con el cual forma solución.

Atotanque: Vehículo de transporte terrestre, usado para la carga y transporte de combustibles de distintas terminales de almacenamiento y reparto de combustibles a gasolineras.

IV. Acrónimos

COV: Compuestos orgánicos volátiles.

PEMEX: Petróleos Mexicanos.

ppm : Partes por millón.

SEMARNAT: Secretaria de medio ambiente y recursos naturales.

TAR: Terminal de almacenamiento y reparo.

RVP: Reid Vapor Pressure.

US EPA: United States Environmental Protection Agency.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a la Guía de Gestión de Tecnología para el Desarrollo de Proyectos de PEMEX, en su edición 2013-2015, se menciona que la tecnología juega un papel muy importante en los resultados de las empresas, pero generalmente no se le da la suficiente atención a su gestión y en ocasiones ni siquiera se reconoce su valor en la cadena productiva por considerar que la tecnología es un bien que se adquiere y con ello acaba su gestión.

Los avances tecnológicos marcan la diferencia entre las empresas líderes y los seguidores, ya que les permite disminuir sus costos, elevar la calidad de productos, encontrar substitutos que ofrezcan mayores ventajas, tener procesos con alto valor, flexibilidad y mejora en sus rendimientos.

En este trabajo de gestión de tecnología, se seleccionara la alternativa tecnológica más apropiada para el tratamiento de compuestos orgánicos volátiles, de una terminal de almacenamiento y reparto de hidrocarburos, considerando las necesidades propias de la terminal, al igual que los aspectos técnicos de la misma.

La selección de una tecnología adecuada, puede mejorar la calidad del aire en las zonas aledañas de la terminal, reducir la formación de contaminantes secundarios como el ozono troposférico.

2. OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo son los siguientes:

- Describir las características y necesidades de una terminal de almacenamiento y reparto (TAR), para el tratamiento de sus emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV).
- Realizar la estimación de emisiones de COV, de una terminal de una TAR.
- Describir las tecnologías disponibles en el mercado para el tratamiento de COV.
- Elaboración de una matriz de comparación de las tecnologías disponibles en el mercado para el tratamiento de COV.
- Establecimiento de criterios de evaluación para la selección de una tecnología para el tratamiento de COV.
- Realizar la evaluación tecnológica de las principales tecnologías disponibles en el mercado para el tratamiento de COV.
- Selección de la mejor alternativa tecnológica para el tratamiento de COV, desde un punto de vista técnico.

3. Hipótesis

Se considera que es posible implementar una tecnología adecuada para el tratamiento de COV, en una terminal de almacenamiento de hidrocarburos, que cuenta actualmente con una unidad de recuperación de COV, que dejó de dar servicio debido a la falta de refacciones disponibles en el mercado.

4. DESARROLLO

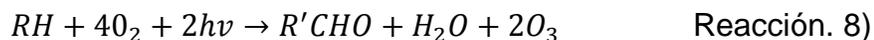
3.1 Antecedentes

Los compuestos orgánicos volátiles, son sustancias con bajos puntos de ebullición y presión de vapor mínima de 0.13 kPa a 25 °C cuya estructura molecular cuenta con uno o más átomos de carbono, además del CO y CO₂.

El principal problema que ocasiona la emisión de COV a la atmosfera es la, formación ozono a nivel de suelo (Ozono troposférico). El mecanismo de reacción para la generación de ozono a partir de COV se presenta a continuación:



De forma global:



En el mecanismo de reacción se expresa que RH, representa a un compuesto orgánico volátil típico (Pentano, isobutano, etc.). El mecanismo inicia con un radical libre OH que sustrae un hidrogeno del hidrocarburo. La captura del átomo de hidrogeno de la Reacción 1) rompe el enlace covalente del hidrocarburo RH, creando un nuevo radical libre R. El radical libre R en presencia de oxígeno forma radicales oxigenados, tal como se muestra en la Reacción 2), esta reacción es muy exotérmica por lo cual se requiere de una molécula M (N₂ u O₂), que elimine energía y estabilice la molécula de RO₂. En la Reacción 3) el radical peroxi (RO₂) oxida una molécula de NO a NO₂ formando el radical RO. El radical RO en presencia de Oxígeno produce un aldehído (R'CHO) y una molécula de OH₂, de tal como se muestra en Reacción 4). En nuevo radical hidropéroxido (HO₂) oxida a otra molécula de NO generando una segunda molécula de NO₂. En la Reacción 6) Las dos moléculas de NO₂ se oxidan a NO en presencia de luz ultravioleta, generando a su vez dos oxígenos atómicos. Como se muestra en la reacción 7), en presencia de O₂, el oxígeno atómico genera ozono (O₃), esta reacción es exotérmica, por lo cual se requiere nuevamente de una molécula M que absorba energía para poder estabilizar al O₃.

La reacción de NO₂ a NO es la única fuente significativa de formación de oxígeno atómico, que es el causante de la formación de ozono. La presencia de O₃ y NO genera NO₂ y O₂, como se muestra en la Reacción 9). Por tal motivo las concentraciones de Ozono troposférico, son bajas.



Para el fin de este trabajo se analizarán las emisiones de COV, provocadas en las operaciones de carga de autotanques de hidrocarburos.

3.2 Caso de estudio

3.2.1 Características de la terminal de almacenamiento y reparto de hidrocarburos.

Como caso de estudio se propone una terminal de almacenamiento y reparto de hidrocarburos, la cual cuenta con una unidad recuperadora de vapores que dejó de dar servicio debido a la falta de refacciones disponibles en el mercado. Debido a esto la TAR se ve la necesidad de adquirir alguna tecnología que garantice el control de emisiones de COV generadas en la operación de llenado de autotanques.

La terminal cuenta con las siguientes características en sitio presentadas en la Tabla 1:

Tabla 1) Datos del sitio.

Datos del sitio donde se ubica la Terminal de almacenamiento y reparto de hidrocarburos	
Altura sobre nivel del mar	2,115 m
Presión barométrica	595 mmHg
Temperatura máxima (bulbo seco)	37.8°C
Temperatura mínima (bulbo seco)	-5 °C
Humedad relativa	60 %

La TAR, almacena y distribuye los siguientes productos: Gasolina Premium, Gasolina Magna, Diésel y Turbosina, cuenta con 18 posiciones de llenado de autotanques, que manejan los productos mencionados. La distribución de hidrocarburos se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2) Productos manejados por la TAR en cada posición de llenado.

Producto	Número de posiciones de llenado
Gasolina Premium	5
Gasolina Magna	7
Diésel	3
Turbosina	2

La TAR realiza en promedio 600 operaciones de llenado de autotanques por día y el flujo de operación máximo de cada bomba de llenado es de 2800 L/min. La capacidad nominal de cada autotanque es de 20 m³.

3.2.1.1 Definición de requerimientos específicos de la TAR

En esta sección se presentan los requerimientos específicos de la TAR, los cuales representan las necesidades, que debe satisfacer en nuevo sistema de tratamiento de COV, los servicios disponibles en el área propuesta para el sistema de tratamiento de COV, al igual que algunas características que debe cumplir el proveedor que suministre el sistema de tratamiento seleccionado.

Los requerimientos mostrados a continuación, serán contemplados para la evaluación de las tecnologías disponibles en el mercado para el tratamiento de COV.

3.2.1.1.1 Filosofía de operación

El nuevo sistema de tratamiento de COV debe operar automáticamente y ser capaz de atender los requerimientos de la TAR, y contar con un sistema de control del tipo supervisorio.

3.2.1.1.2 Flexibilidad de operación

Como se mencionó anteriormente, la TAR realiza en promedio 600 operaciones de llenado de autotanques por día y no se tiene considerada alguna expansión a futuro. Para efectos del diseño del nuevo sistema de tratamiento de COV, se está tomando en consideración la capacidad y condiciones actuales.

El nuevo sistema deberá ser capaz de operar 24 horas al día, los 365 días del año, iniciar y detener su operación en función de la generación de COV por inicio de las operaciones de llenado de autotanques, además deberá contar con un sistema de inertización cuando éste se encuentre fuera de operación.

3.2.1.1.3 Condiciones y disponibilidad de sistemas y servicios auxiliares

En el área destinada para el nuevo sistema de tratamiento de COV, se dispone de los siguientes servicios auxiliares:

- Agua de enfriamiento: Disponible.
- Agua contra incendio: Disponible.
- Agua de servicio: Disponible.
- Sistema de desfogue: Disponible.
- Aire de instrumentos: Disponible.
- Drenaje pluvial: Disponible.
- Drenaje Aceitoso: Disponible.

3.2.1.1.4 Bases de diseño.

El sistema de tratamiento de COV que se seleccione para su adquisición, deberá contemplar los siguientes criterios de diseño:

- Temperatura del sitio = 36.8 °C
- Presión atmosférica.= 595 mmHg
- Humedad del sitio = 60 %

Para el diseño del nuevo sistema, se debe considerar la siguiente composición típica de vapores de gasolina, tomando como referencia los del proveedor JOHN ZINK¹.

Tabla 3) Composición típica de Vapores de Gasolina.

Compuesto	% Volumen	% Masa
Propano	0.6	0.6
I-Butano	2.9	3.8
Butano	3.2	4.0
n-Butano	17.4	22.5
I-Pentano	7.7	12.4
Pentano	5.1	8.0
n-Pentano	2.0	3.1
Hexano	3.0	8.0
Aire	58.1	37.6
Total	100.0	100.0

El nuevo sistema de tratamiento de COV, deberá de manejar los siguientes parámetros:

¹ Valores reportados en: Vapour Control Solutions for Product Transfer operation: An Overview, Marco Puglisi, 2011 by John Zink Company.

- Las emisiones a la atmósfera pueden contener un máximo de 10 mg de COV por cada litro de combustible cargado.²
- Deberá realizar su arranque y paro de forma automática.
- Manejo de la mezclas de vapores generados en la carga de los distintos productos de la TAR.

3.2.1.1.5 Requerimientos de seguridad

El nuevo sistema de tratamiento de COV deberá estar diseñado a prueba de explosión, contar con sistemas de protección contra incendio, alarmas audibles, visuales y detección de mezclas explosivas.

3.2.1.1.6 Requerimientos de capacitación

El proveedor del nuevo sistema de tratamiento de COV, deberá tener dentro de su alcance la obligación de impartir cursos de capacitación certificados para que el personal técnico, operativo y de mantenimiento de la TAR, conozca, arranque, opere, supervise y mantenga en condiciones óptimas y de seguridad el nuevo sistema, tanto en condiciones normales de operación como en situaciones de emergencia.

3.2.1.1.7 Requerimientos de refaccionamiento

El proveedor del sistema de tratamiento de COV, deberá contar con un stock de refacciones necesarias para la aplicación de los planes de mantenimiento preventivo y correctivo para un periodo de 20 años.

² Valor obtenido de STANDARD 40 CFR PARTE 63. SUBPARTE R "NATIONAL EMISSION STANDARDS FOR GASOLINE DISTRIBUTION FACILITIES"

3.2.1.1.8 Garantías

El proveedor deberá de garantizar el equipo, los controles y accesorios del nuevo sistema de tratamiento de COV, contra defectos de fabricación, falla, mala instalación o diseño impropio, por un periodo mínimo de 24 meses después de haber puesto el sistema en operación.

3.2.1.1.9 Requerimientos generales de control

El nuevo sistema de tratamiento de COV deberá:

- Ser capaz de monitorear los COV en cuanto a volumen y condiciones de alimentación, así mismo poder monitorear y cuantificar la concentración de las emisiones para verificar su correcto funcionamiento.
- Operar de forma manual y automática, contar con un sistema de monitoreo y control de la operación, así mismo deberá mandar señales la torre de control.
- Contar con panel de control local Manual-Automático.

3.2.1.1.10 Disponibilidad de instalaciones eléctricas

La TAR cuenta con energía eléctrica en una tensión de 480 VCA para servicio en el área destinada para el nuevo sistema de tratamiento de COV, esta alimentación es por medio de ductos subterráneos hasta el límite de batería del área.

3.2.2 Cálculo de emisiones

La emisión de COV en las operaciones de carga y descarga de autotanques, representa un porcentaje significativo de las emisiones de compuestos orgánicos a

la atmósfera, dichas pérdidas por carga y descarga, están compuestas por tres factores principales:

- Vapores producidos por la evaporación de residuos de cargas previas.
- Vapores transferidos desde otro tanque de almacenamiento en operaciones de descargas a estaciones de servicio.
- Vapores generados en el tanque debido a la carga de nuevos productos.

Por otra parte, la cantidad de pérdidas por evaporación en las operaciones de carga de autotanques están en función de las siguientes características:

- Características fisicoquímicas de los productos de cargas previas.
- Metodología de carga de autotanques.
- Características fisicoquímicas de los productos de la nueva carga.

Para el cálculo de emisiones de compuestos orgánicos volátiles se utilizará el método presentado en el documento AP-42 "Compilation of air pollutant emission factors", 5.2 Transportation And Marketing Of Petroleum Liquids¹⁻³, US Environmental Protection Agency (US EPA), el cual considera los puntos anteriormente mencionados.

3.2.2.1 Consideraciones

- Se tomó el escenario de temperatura más crítica, correspondiente a 37.8 °C
- Se considera que todas las posiciones de llenado operan simultáneamente.
- Se consideró que en promedio cada autotanque es llenado hasta un 80% de su capacidad nominal (Factor de llenado F).
- Se consideró que los COV, tienen un comportamiento de gas ideal.
- Se consideró que el llenado de autotanques es por la parte inferior y que su factor de saturación (S) corresponde a un tanque vacío que se encuentra en equilibrio líquido-vapor. Los factores de saturación fueron recopilados de la

sección 7 del documento AP-42 “Compilation of air pollutant emission factors” y se muestran en la Tabla 4 Factores de saturación para metodología de carga de autotanque.

Tabla 4) Factores de saturación para metodología de carga de autotanque.

Transporte	Tipo de carga	Factor S
Autotanque	Carga sumergida en un autotanque limpio	0.5
	Carga sumergida en un autotanque en servicio	0.6
	Carga sumergida en un autotanque en equilibrio líquido vapor	1
	Carga a chorro en un autotanque limpio	1.45
	Carga a chorro en un autotanque en servicio	1.45
	Carga a chorro en un autotanque en equilibrio líquido vapor	1
Buquetanque	Carga sumergida en Barcos	0.2
	Carga sumergida en barcazas	0.5

- El tiempo de llenado se estableció mediante la correlación del 80% del volumen nominal del autotanque entre el flujo máximo de entrega de combustible desde la casa de bombas.
- Las propiedades fisicoquímicas de los vapores generados (masa molecular y presión de vapor) se consultaron en la sección 7 del documento AP-42 “Compilation of air pollutant emission factors, TABLE 3-2. Properties (MV, WVC, WL, PV) of selected petroleum liquids”, considerando al Diésel como “Combustible destilado de petróleo No.2”, a la Gasolina Premium como “Gasolina RVP 7”, a la gasolina Magna como “Gasolina RVP 10” y a la Turbosina como “Jet naphta (JP-4)”. Las propiedades de estos combustibles son mostradas en la Tabla 5 Propiedades físicas de algunos hidrocarburos.

Tabla 5 Propiedades físicas de algunos hidrocarburos.

Propiedades físicas de algunos hidrocarburos	Masa molecular del vapor de producto (M) [lb/lbmol]	Presión de vapor (P°) [psi]
Gasolina Premium	68	7.4
Gasolina Magna	66	10.5
Diésel	130	0.0022
Turbosina	80	2.7

3.2.2.2 Metodología de cálculo

De acuerdo al AP-42 “Compilation of air pollutant emission factors”, el cálculo de emisiones se determina de acuerdo a la Ecuación 1. Este método de cálculo es aceptable en la etapa de ingeniería conceptual, pero es recomendable realizar mediciones en campo, para corroborar los valores de emisiones.

$$L_L = 12.46 \frac{SPM}{T} \quad \text{Ecuación. 1)}$$

$$L_L = \frac{\text{lb de COV}}{1000 \text{ gal de producto alimentado}}$$

- L_L : Pérdida por carga [lb de COV/1000 gal].³
- S: Factor de saturación [adimensional].
- P°: Presión de vapor del líquido cargado [psi].
- M: Masa molecular del vapor de producto [lb/lbmol].
- T: Temperatura del líquido cargado [R].

³ Para convertir a mg/l, multiplicar por 119839.36 (mg*gal)/(lb*I)

Las pérdidas de COV generadas en la operación de llenado expresadas en ppm se calculan con la Ecuación 2.

$$ppm = L_L \frac{lb}{gal} * \frac{453.59 g}{lb} * \frac{264.17 gal}{m^3} * \frac{\left(R \frac{L * mmHg}{K * gmol} \right) * (T K) * 1000 \frac{mL}{m^3}}{(P mm Hg) * (M \frac{g}{gmol})} =$$

$$\frac{mL}{m^3} = ppm \quad \text{Ecuación 2)}$$

- P: Presión del sitio [mmHg].
- M: Masa molecular del vapor de producto [g/mol].
- R: Constante universal de los gases [L*mmHg/K*mol].
- T: Temperatura del líquido cargado [K].

Para calcular las emisiones al llenar un único autotanque se propone la Ecuación 3.

$$EM_{COV} = V_A * L_L * F \quad \text{Ecuación. 3)}$$

- EM_{COV}: Libras de COV, generadas en una operación de llenado [lb].
- V_A: Volumen del autotanque [gal].
- L_L: Pérdida de producto por carga [lb de COV/1000 gal].
- F: Porcentaje de llenado, del volumen nominal de un autotanque.

Al dividir las libras de COV, generadas en una operación de llenado por el tiempo de llenado y el número de posiciones de llenado de autotanques que operan de forma simultánea, se obtiene el flujo másico de las emisiones de la TAR, la expresión se muestra en la Ecuación 4.

$$C_{COV} = \frac{EM_{COV} * N}{t} \quad \text{Ecuación. 4)}$$

- C_{COV} : Flujo másico [lb/min].
- EM_{COV} : Libras de COV, generadas en una operación de llenado [lb].
- N : Número de posiciones de llenado operando de forma simultánea.
- t : Tiempo de llenado del autotanque [min].

Para obtener el flujo volumétrico de COV, se requiere calcular su volumen a condiciones del sitio, para ello se considera que los COV tienen un comportamiento ideal, de esta manera el volumen de COV generados se puede calcular con la Ecuación 5.

$$V_{COV} = \frac{nRT}{P} \quad \text{Ecuación. 5)}$$

- V_{COV} : Volumen de COV [L].
- n : mol, generados en una operación de llenado [mol].
- R : Constante universal de los gases [L*mmHg/K*mol].
- T : Temperatura del líquido cargado [K].
- P : Presión del sitio [mmHg].

Una vez obtenido el volumen de COV, se procede a dividir el volumen obtenido entre el tiempo de llenado, para obtener el flujo volumétrico, el cual se expresa con la Ecuación 6)

$$Q_{COV} = \frac{V_{COV}}{t} \quad \text{Ecuación. 6)}$$

El resumen de emisiones generadas en las distintas operaciones de llenado de autotanques se muestra en las tablas 6 – 9.

3.2.2.3 Resumen de emisiones

Tabla 6) Estimación de emisiones generadas por carga de Gasolina Premium

Escenario crítico de emisiones de COV	
Hidrocarburo:	Gasolina Premium
Estimación emisión de COV por operación de llenado	
Carga sumergida en un autotanque en equilibrio líquido vapor	
Factor S	1
Presión de vapor P°	7.4 psi
Peso molecular M	68 lb/lbmol
Temperatura de llenado	100 °F
Temperatura de llenado	560 R
Pérdidas de combustible en llenado L _L	11.20 lb/1000 gal
Pérdidas de combustible en llenado L _L	0.01 lb/gal
Pérdidas de combustible en llenado L _L	1,341.75 mg/L
Pérdidas de combustible en llenado L _L	643,447 ppm
Flujo másico de COV generados en operación de llenado	
Volumen de autotanque	20 m ³
Factor de llenado	0.8
Volumen de combustible suministrado	16 m ³
Masa emitida por autotanque	21.47 kg/Tanque
Número de autotanques llenados simultáneamente	5
COV generados en llenado	107.33 kg
Flujo máximo de llenado	2,800 L/min
Tiempo llenado	7.14 min
Flujo de COV generado en llenado	15.03 kg/min
Flujo de COV generado en llenado	901.54 kg/h
Flujo volumétrico de COV generados en operación de llenado	
Número de moles totales de COV	1,578.33 mol
Presión atmosférica del sitio	595 mmHg
Temperatura del sitio	310.95 K
Constante universal de los gases	62.36 L*mmHg/K*mol
Volumen total de COV generados	51,440.63 L
Volumen total de COV generados	51.44 m ³
Flujo volumétrico	7.20 m ³ /min
Flujo volumétrico	432.10 m ³ /h

Tabla 7) Estimación de emisiones generadas por carga de Gasolina Magna

Escenario crítico de emisiones de COV	
Hidrocarburo:	Gasolina Magna
Estimación emisión de COV por operación de llenado	
Carga sumergida en un autotanque en equilibrio líquido vapor	
Factor S	1
Presión de vapor P°	10.5 psi
Peso molecular M	66 lb/lbmol
Temperatura de llenado	100 °F
Temperatura de llenado	460 R
Pérdidas de combustible en llenado L _L	18.77 lb/1000 gal
Pérdidas de combustible en llenado L _L	0.02 lb/gal
Pérdidas de combustible en llenado L _L	2,249.54 mg/L
Pérdidas de combustible en llenado L _L	1,111,478 ppm
Flujo másico de COV generados en operación de llenado	
Volumen de autotanque	20 m ³
Factor de llenado	0.8
Volumen de combustible suministrado	16 m ³
Masa emitida por autotanque	35.99 kg
Número de autotanques llenados simultáneamente	7
COV generados en llenado	251.92 kg/Tanque
Flujo máximo de llenado	2,800 L/min
Tiempo llenado	7.14 min
Flujo de COV generado en llenado	35.27 kg/min
Flujo de COV generado en llenado	2,116.11 kg/h
Flujo volumétrico de COV generados en operación de llenado	
Número de moles totales de COV	3,816.93 mol
Presión atmosférica del sitio	595 mmHg
Temperatura del sitio	310.95 K
Constante universal de los gases	62.36 L*mmHg/K*mol
Volumen total de COV generados	124,400.48 L
Volumen total de COV generados	124.40 m ³
Flujo volumétrico	17.42 m ³ /min
Flujo volumétrico	1,044.96 m ³ /h

Tabla 8) Estimación de emisiones generadas por carga de Diésel

Escenario crítico de emisiones de COV	
Hidrocarburo:	Diésel
Estimación emisión de COV por operación de llenado	
Carga sumergida en un autotanque en equilibrio líquido vapor	
Factor S	1
Presión de vapor P°	0.0022 psi
Peso molecular M	130 lb/lbmol
Temperatura de llenado	100 °F
Temperatura de llenado	460 R
Pérdidas de combustible en llenado L _L	0.01 lb/1000 gal
Pérdidas de combustible en llenado L _L	0.000008 lb/gal
Pérdidas de combustible en llenado L _L	0.93 mg/L
Pérdidas de combustible en llenado L _L	233 ppm
Flujo másico de COV generados en operación de llenado	
Volumen de autotanque	20 m ³
Factor de llenado	0.8
Volumen de combustible suministrado	16 m ³
Masa emitida por autotanque	0.01 kg/Tanque
Número de autotanques llenados simultáneamente	3
COV generados en llenado	0.04 kg
Flujo máximo de llenado	2,800 L/min
Tiempo llenado	7.14 min
Flujo de COV generado en llenado	0.01 kg/min
Flujo de COV generado en llenado	0.37 kg/h
Flujo volumétrico de COV generados en operación de llenado	
Número de moles totales de COV	0.34 mol
Presión atmosférica del sitio	595 mmHg
Temperatura del sitio	310.95 K
Constante universal de los gases	62.36 L*mmHg/K*mol
Volumen total de COV generados	11.17 L
Volumen total de COV generados	0.01 m ³
Flujo volumétrico	0.002 m ³ /min
Flujo volumétrico	0.09 m ³ /h

Tabla 9) Estimación de emisiones generadas por carga de Turbosina

Escenario crítico de emisiones de COV	
Hidrocarburo:	Turbosina
Estimación emisión de COV por operación de llenado	
Carga sumergida en un autotanque en equilibrio líquido vapor	
Factor S	1
Presión de vapor P°	2.7 psi
Peso molecular M	80 lb/lbmol
Temperatura de llenado	100 °F
Temperatura de llenado	460 R
Pérdidas de combustible en llenado L _L	5.85 lb/1000 gal
Pérdidas de combustible en llenado L _L	0.005851 lb/gal
Pérdidas de combustible en llenado L _L	701.15 mg/L
Pérdidas de combustible en llenado L _L	285,809 ppm
Flujo másico de COV generados en operación de llenado	
Volumen de autotanque	20 m ³
Factor de llenado	0.8
Volumen de combustible suministrado	16 m ³
Masa emitida por autotanque	11.22 kg/Tanque
Número de autotanques llenados simultáneamente	2
COV generados en llenado	22.43 kg
Flujo máximo de llenado	2,800 L/min
Tiempo llenado	7.14 min
Flujo de COV generado en llenado	3.14 kg/min
Flujo de COV generado en llenado	188.45 kg/h
Flujo volumétrico de COV generados en operación de llenado	
Número de moles totales de COV	280.43 mol
Presión atmosférica del sitio	595 mmHg
Temperatura del sitio	310.95 K
Constante universal de los gases	62.36 L*mmHg/K*mol
Volumen total de COV generados	9,139.63 L
Volumen total de COV generados	9.14 m ³
Flujo volumétrico	1.28 m ³ /min
Flujo volumétrico	76.77 m ³ /h

3.3 Descripción de las principales tecnologías disponibles en el mercado para el control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV).

A continuación se presentan las distintas tecnologías disponibles en el mercado para el control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles, las cuales se dividen en dos grupos: Tecnologías recuperativas y destructivas.

Las tecnologías recuperativas, basan sus principios de operación en la recuperación de COV, para su uso como combustible, mientras que las tecnologías destructivas no recuperan los COV, pero se encargan de reducirlos a productos más simples como CO₂ y vapor de agua.

Entre las tecnologías recuperativas de COV, se encuentran:

- Absorción - Adsorción.
- Compresión mecánica.
- Condensación criogénica.
- Membranas.

Entre las tecnologías destructivas de COV, se encuentran:

- Oxidación Térmica.
- Oxidación Catalítica.
- Biofiltración.

3.3.1 Descripción del proceso de Absorción – Adsorción.

La adsorción se refiere a procesos donde las moléculas de COV son removidas de la corriente gaseosa al transferirse a la superficie sólida del adsorbente, existen dos tipos de procesos de adsorción: adsorción química y adsorción física.

En la adsorción física, la molécula del contaminante es ligeramente retenida en la superficie del adsorbente por débiles fuerzas electrostáticas, de manera que el material puede ser fácilmente regenerado y las moléculas separadas del material adsorbente. El carbón activado es el adsorbente más usado hoy en día para remover COV.

El sistema de tratamiento de COV está equipado con dos tanques adsorbedores con lechos de carbón activado, un tanque adsorbente recibe los vapores funcionando en el modo de adsorción, mientras que el otro está en modo de regeneración, este sistema cuenta con válvulas de apertura y cierre de forma automática que permite el flujo de los vapores de forma continua y alternada a cada tanque durante un lapso de tiempo de 15 minutos, que es el tiempo usado para la regeneración del carbón activado.

Durante la adsorción el flujo de vapores pasa a través del lecho de carbón activado, mismo que atrapa los hidrocarburos dejando pasar una mezcla de aire e hidrocarburos en mínima proporción hasta que el carbón activado presenta una saturación de los poros y ya no es posible la captación de hidrocarburos en él.

Durante el proceso de regeneración, los vapores captados por el carbón activado son removidos por medio de vacío hasta conseguir la liberación total de los hidrocarburos retenidos, una vez que son desprendidos del carbón activado, la válvula de venteo localizada en la parte superior del tanque adsorbente es abierta

de forma que se igualan las presiones exteriores e interiores del tanque y se puedan generar emisiones con bajas concentraciones de COV.

Los hidrocarburos recuperados son enviados a una torre de absorción por medio de una bomba de tornillo seco, con esto se inicia el proceso de absorción. Este proceso consiste básicamente en la circulación de vapores con hidrocarburos a través de una torre de absorción la cual es alimentada con gasolina fresca a contra corriente como medio absorbente, con esto la gasolina fresca capta los hidrocarburos de los vapores recuperando en forma líquida, los cuales están listos para su disposición o envío a un tanque de almacenamiento; los hidrocarburos no recuperados en este proceso son recirculados a los lechos de carbón activado para continuar con su remoción en el proceso.

Dentro de este proceso, se requiere contar con dos bombas, una para la recirculación de gasolina fresca dentro del proceso y otra para el envío de la gasolina con hidrocarburos captados en el sistema al tanque de almacenamiento.

La bomba de vacío utilizada en este proceso utiliza como medio refrigerante la misma gasolina fresca usada en la torre de absorción

El carbón activado tiene una capacidad calorífica y conductividad térmica muy baja, facilitando que en el lecho de carbón se generen puntos calientes. Los puntos calientes en el lecho de carbón, pueden generar riesgos de incendio, por lo cual un sistema de protección por temperatura, es fundamental para la operación segura de los adsorbedores.

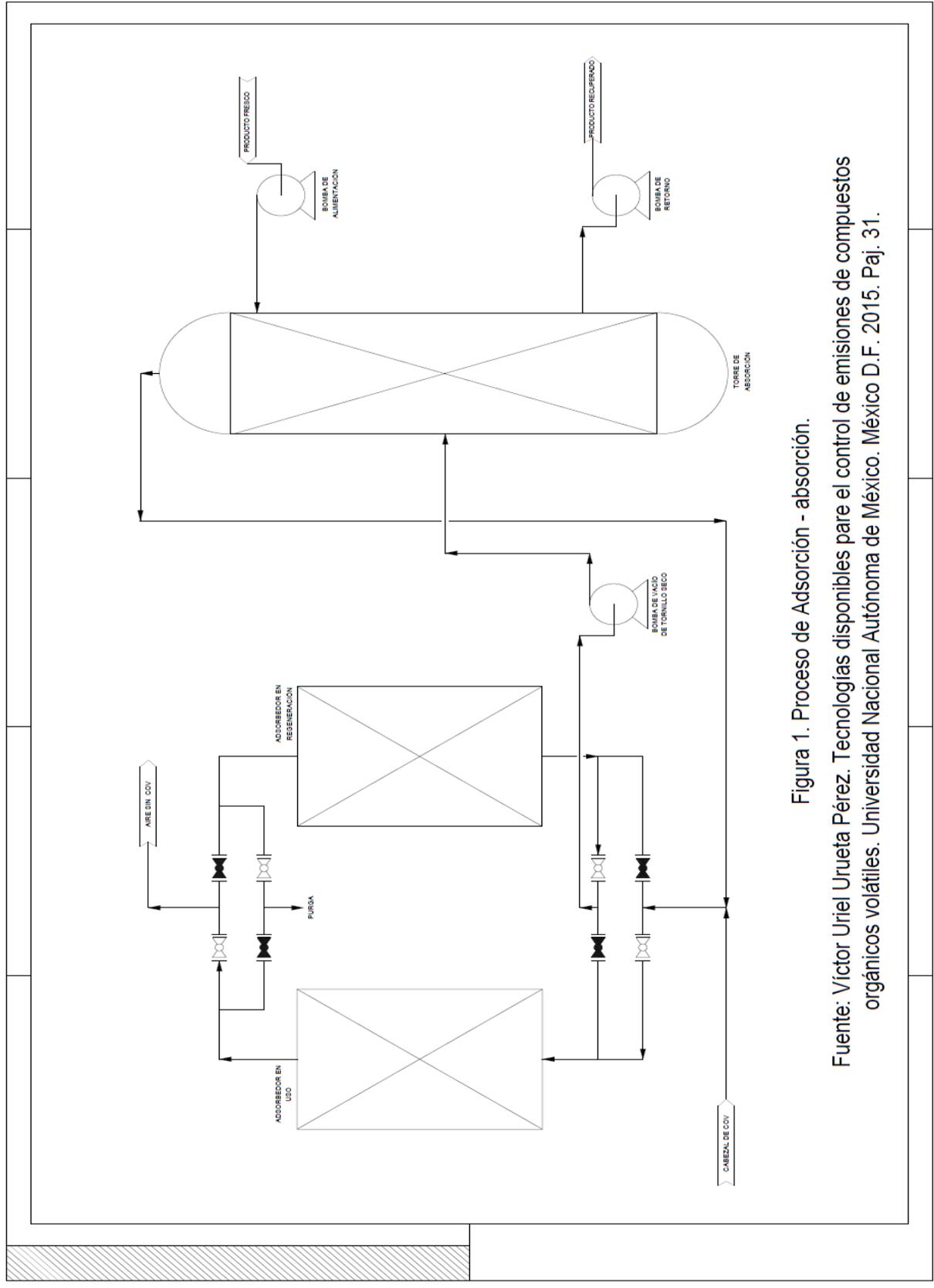


Figura 1. Proceso de Adsorción - absorción.

Fuente: Víctor Uriel Urueta Pérez. Tecnologías disponibles para el control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 2015. Paj. 31.

3.3.2 Descripción del proceso de Compresión Mecánica.

Esta tecnología consiste en un sistema compuesto por tres elementos básicos: compresor, condensador y un tanque de almacenamiento de condensados. El proceso consiste en elevar la presión de entrada de los vapores por medio del compresor y la aplicación de bajas temperaturas en el condensador para forzar la separación de fases y condensar los hidrocarburos para su almacenamiento o disposición.

El compresor usado en esta tecnología puede ser de dos tipos: reciprocante cuando los vapores tiene contenido de humedad, y el rotatorio que es usado cuando los vapores están libres de humedad.

El condensador es donde los COV a una presión alta son sometidos a bajas temperaturas para forzar la condensación de los hidrocarburos y pasar de la fase gaseosa a líquida. El condensador es un intercambiador de calor, que utiliza como medio de enfriamiento agua fría, salmuera, refrigerante o nitrógeno gaseoso; este elemento de enfriamiento es definido por el tecnólogo de acuerdo a las condiciones de diseño requeridas por el sistema.

Una vez realizada la separación de fases, los hidrocarburos condensados son mandados aun tanque de almacenamiento mientras que el aire con bajas concentraciones de COV es emitido a la atmósfera.

Esta tecnología tiene mayor aplicación en procesos con gas natural o metano manejando grandes volúmenes y altas concentraciones. Para el uso de esta tecnología en el tratamiento de vapores de gasolina o más pesados, se requiere adaptarse a otra tecnología como adsorción, absorción, crio condensación, etc. debido a que por sí misma es limitada para el tratamiento de este tipo de hidrocarburos.

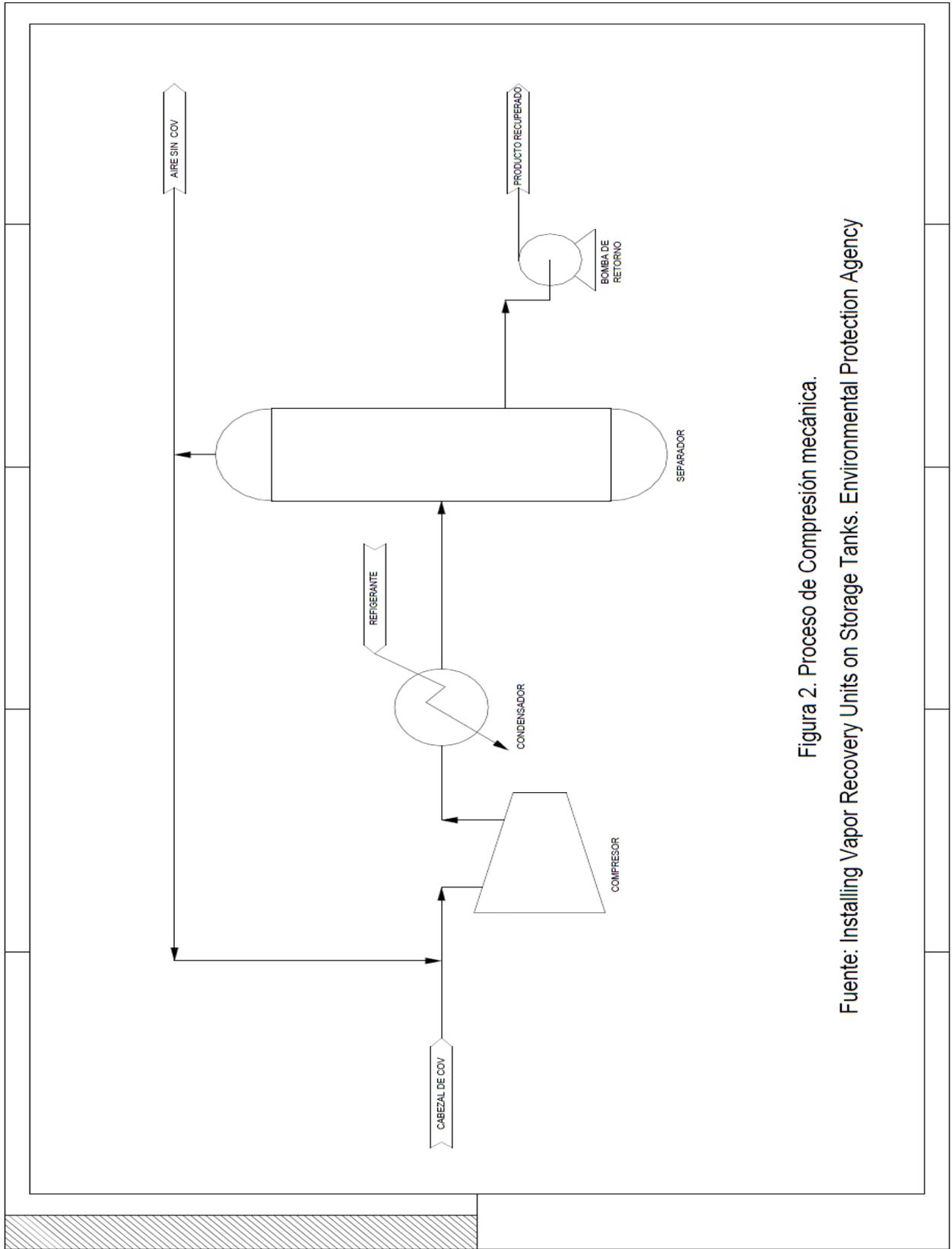


Figura 2. Proceso de Compresión mecánica.

Fuente: Installing Vapor Recovery Units on Storage Tanks. Environmental Protection Agency

3.3.3 Descripción del proceso de Condensación criogénica

Esta tecnología utiliza una técnica de separación en la cual uno o más componentes volátiles de una mezcla de vapor son separados por medio de saturación, este cambio de fase de gas a líquido se obtiene al disminuir la temperatura de los vapores a una presión constante.

Los COV tienen temperaturas de condensación por debajo de -100 C , por ello es que se utiliza el nitrógeno líquido como elemento refrigerante por su baja temperatura de -190 C .

En el tratamiento de COV por condensación criogénica se utilizan normalmente dos tipos de intercambiadores: los de superficie y los de contacto.

En los condensadores de superficie, el refrigerante no entra en contacto con la corriente siendo los más comunes los intercambiadores del tipo de tubo y coraza.

Los condensadores de contacto enfrían la corriente de vapor al rociar un líquido frío directamente en la corriente, el refrigerante usado en los condensadores de contacto se mezcla con la corriente de vapores y como consecuencia, el refrigerante y los COV no pueden ser usados nuevamente sin pasar por un proceso de separación adicional.

La condensación es más eficiente para COV con puntos de ebullición por arriba de 38 °C . Los COV con bajo punto de ebullición (menor a 38 °C), requieren servicios de enfriamiento criogénico con nitrógeno gas y líquido.

Se requiere eliminar la humedad de la corriente de entrada mediante un proceso de pre-enfriamiento para evitar su congelamiento y tener una mala transferencia de calor, a partir de un 20% de humedad relativa el proceso comienza

a disminuir su eficiencia. No obstante los proveedores garantizan un funcionamiento eficiente ante el parámetro de la humedad puesto que se diseña a condiciones del sitio.

La condensación criogénica por contacto produce líquidos que posteriormente deben ser tratados con algún proceso de separación adicional para poder ser reusados en el proceso.

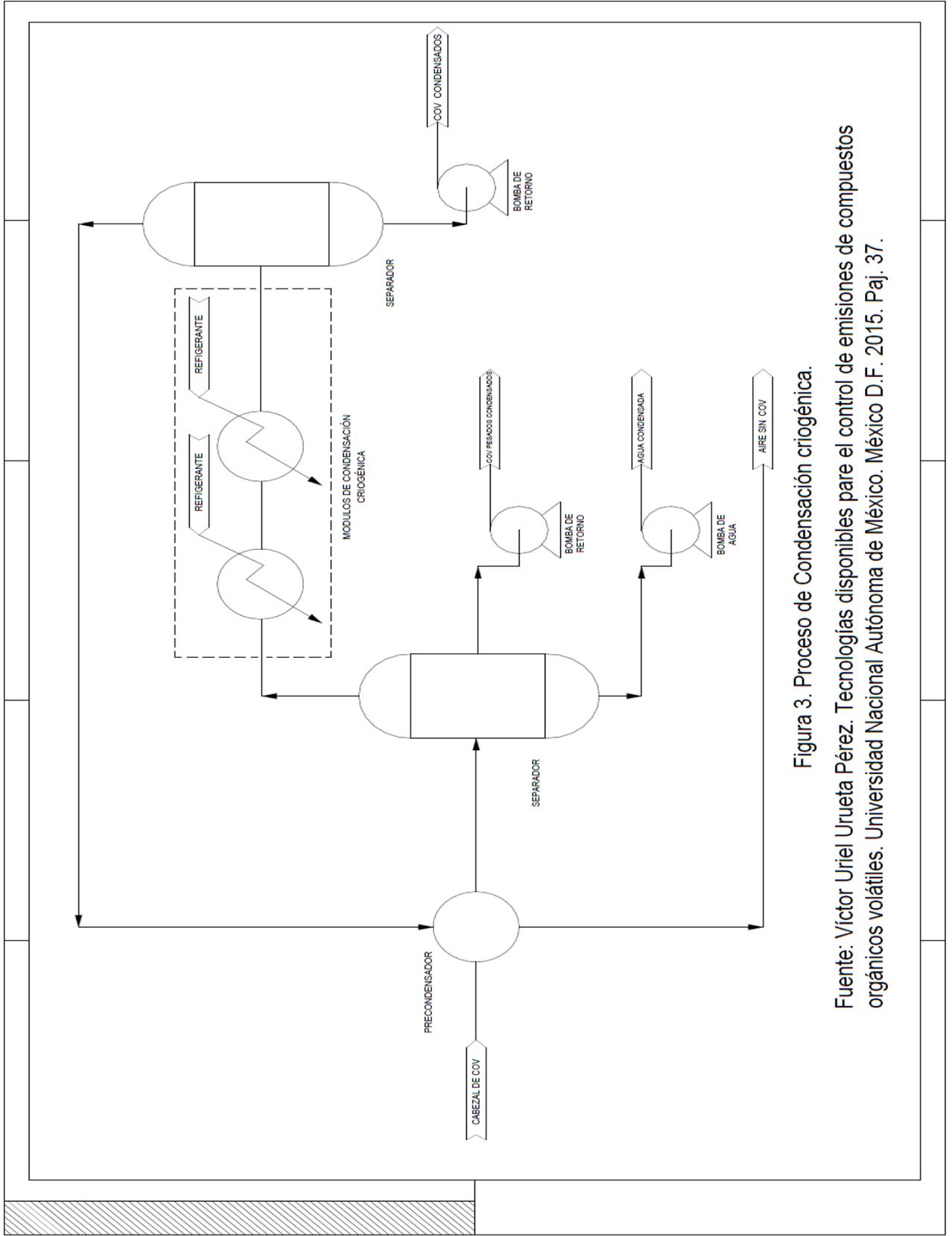


Figura 3. Proceso de Condensación criogénica.

Fuente: Víctor Uriel Urueta Pérez. Tecnologías disponibles para el control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 2015. Paj. 37.

3.3.4 Descripción del proceso a base de Membranas

El módulo de membrana es sólo una adición a los procesos de recuperación de vapores por Absorción - Adsorción y condensación por compresión mecánica, el agregar módulos de membrana a los procesos de recuperación de vapores tiene un beneficio ambiental que se ve reflejado en la emisión COV a la atmósfera mediante un proceso más eficiente de separación aire COV.

El diseño híbrido aprovecha la capacidad de producir una corriente de residuos de alta pureza además de ofrecer la flexibilidad para ajustar los parámetros de emisiones a la atmósfera.

Con el uso de módulos individuales de membranas, (que no cuenten con un proceso principal de tratamiento de COV) se requiere la instalación un banco de membranas para lograr una correcta remoción de COV, al igual que una baja concentración de los mismos.

Al módulo de membranas entra una corriente de gas de hidrocarburos a alta presión, por lo que una bomba debe proporcionar el vacío adecuado para garantizar el correcto funcionamiento de la membrana, el gas permeado se encuentra enriquecido por hidrocarburos y el gas retenido es el gas limpio.

Las membranas trabajan bajo el principio de permeabilidad, es decir, la separación se logra principalmente por la diferencias en velocidades de difusión provocadas por la diferencia del tamaño de las moléculas.

Las membranas normalmente se usan con las tecnologías de absorción y compresión mecánica.

3.3.4.1 Adsorción - membranas - absorción

La instalación de un módulo de membrana al proceso de absorción garantiza una mayor pureza en las emisiones a la atmósfera reduciendo en gran medida la cantidad de COV.

Los vapores que salen de la torre de absorción pasan a través de la membrana permeable donde más de los COV son recuperados por permeación y recirculados mediante una bomba de vacío al proceso de absorción, los gases no permeados están limpios de COV y son emitidos a la atmósfera.

La bomba de vacío debe crear una diferencia de presión entre ambos lados de la membrana para su correcto funcionamiento.

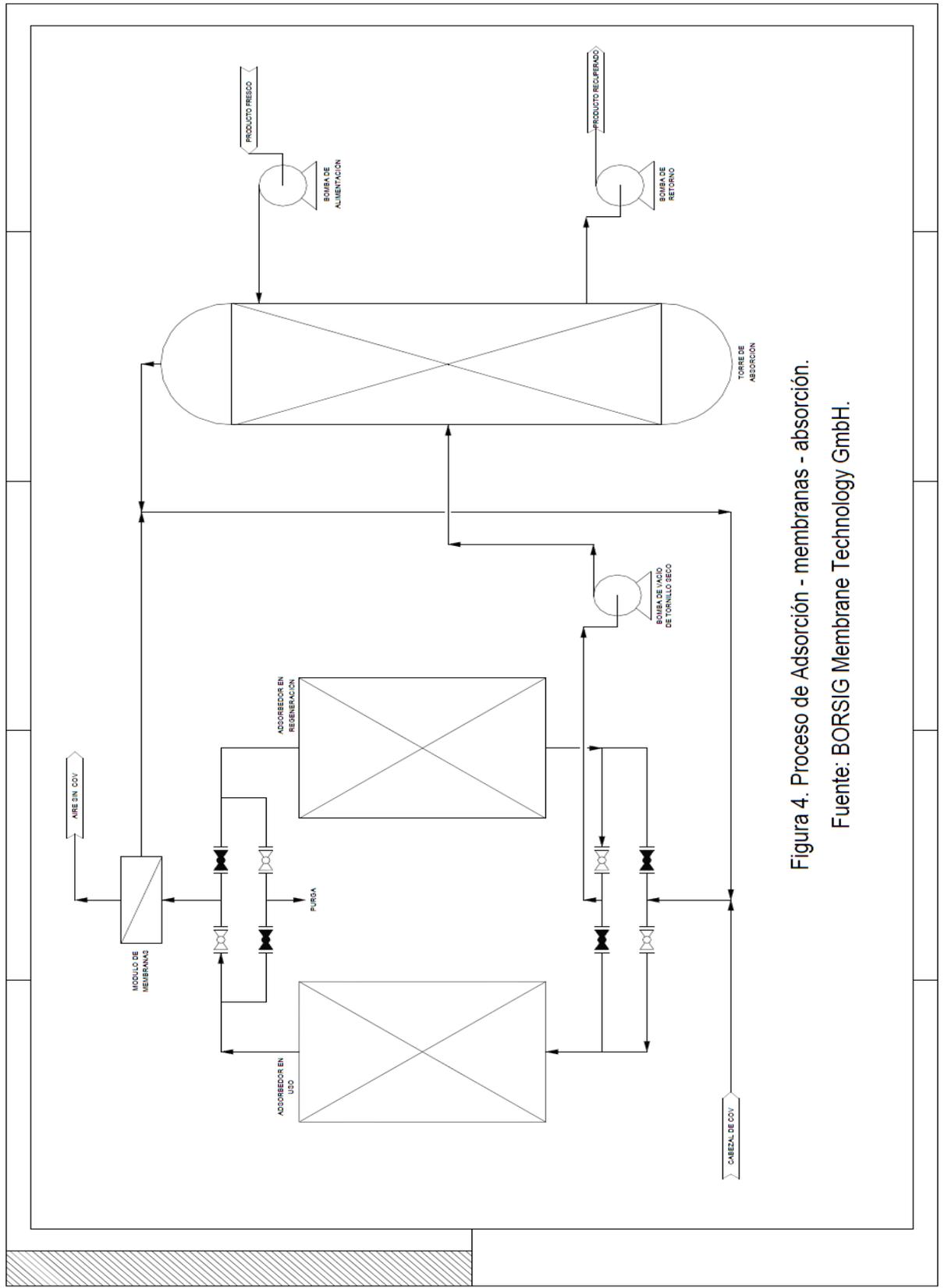


Figura 4. Proceso de Adsorción - membranas - absorción.
Fuente: BORSIG Membrane Technology GmbH.

3.3.4.2 Condensación por compresión mecánica-membrana.

La instalación de un módulo de membrana al proceso de condensación por compresión mecánica garantiza una mayor pureza en las emisiones a la atmósfera reduciendo en gran medida la cantidad de COV.

Los vapores que salen del separador pasan a través de la membrana permeable donde más de los COV son recuperados por permeación y recirculados nuevamente al proceso, los gases no permeados están limpios de COV y son emitidos a la atmósfera.

Figura 5. Proceso de Compresión Mecánica - Membrana.

Fuente: BORSIG Membrane Technology GmbH

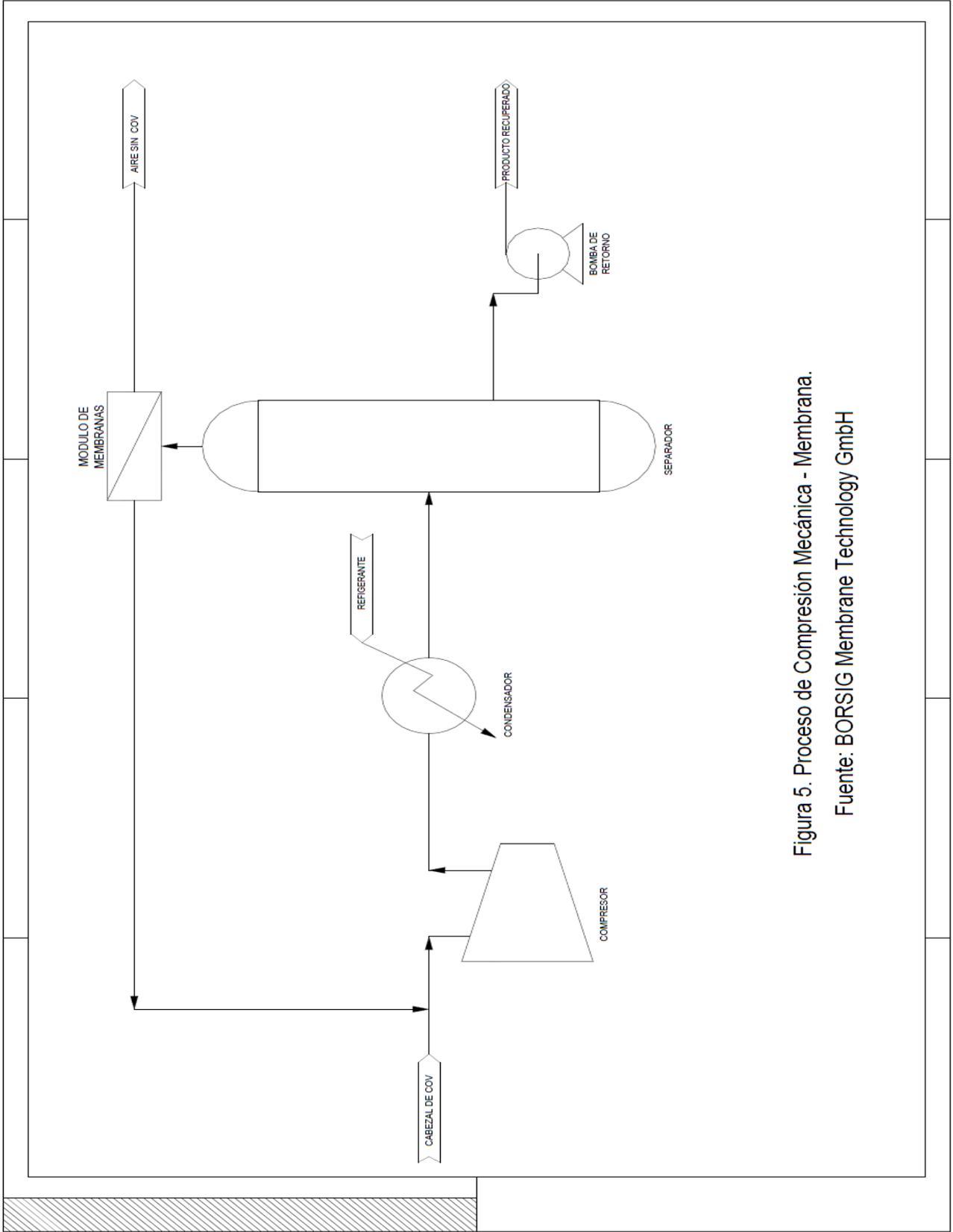


Figura 5. Proceso de Compresión Mecánica - Membrana.

Fuente: BORSIG Membrane Technology GmbH

3.3.5 Descripción del proceso de Oxidación térmica

La oxidación térmica es uno de los métodos de control de emisiones más frecuentemente utilizados cuando la concentración de vapores orgánicos es generalmente 50% menor al límite inferior de explosividad.

Las tecnologías más frecuentemente utilizadas para el tratamiento de COV de hidrocarburos, son: Oxidación térmica recuperativa, oxidación térmica regenerativa y oxidación catalítica, los tres medios de tratamiento pertenecen a la categoría de métodos destructivos, ya que no recuperan producto a partir de los vapores de hidrocarburos.

A continuación se describen los sistemas de tratamiento a partir de Oxidación térmica recuperativa, oxidación térmica regenerativa.

3.3.5.1 Oxidación térmica recuperativa

El proceso consiste en someter los vapores de hidrocarburos a una temperatura suficientemente alta durante el tiempo necesario para producir la oxidación de los contaminantes, por lo tanto, para conseguir una depuración eficaz es necesario combinar temperatura (entre 750 y 1200 °C), durante un tiempo mínimo para completar la reacción de oxidación y con una turbulencia en los gases que permita una mezcla perfecta de todos sus componentes.

Estas condiciones se consiguen en el interior de una cámara de oxidación diseñada para tal fin y que está equipada con un quemador que utiliza como comburente el propio gas a depurar consiguiendo así disminuir al máximo la energía necesaria para el proceso de depuración.

Como la temperatura de los gases que salen de la cámara de oxidación es muy elevada, se hace necesario recuperar su energía por procedimientos como el

precalentamiento de los vapores, la generación de vapor, etc. Sí la concentración de contaminantes orgánicos es elevada, estas instalaciones son convenientes porque permiten aprovechar en el proceso industrial el calor de oxidación de los contaminantes.

Estos sistemas se caracterizan por tener una eficacia muy elevada y ofrecen la posibilidad de valorización energética de los residuos gaseosos. Por el contrario, si las concentraciones de contaminantes son bajas, resulta un alto costo energético de operación.

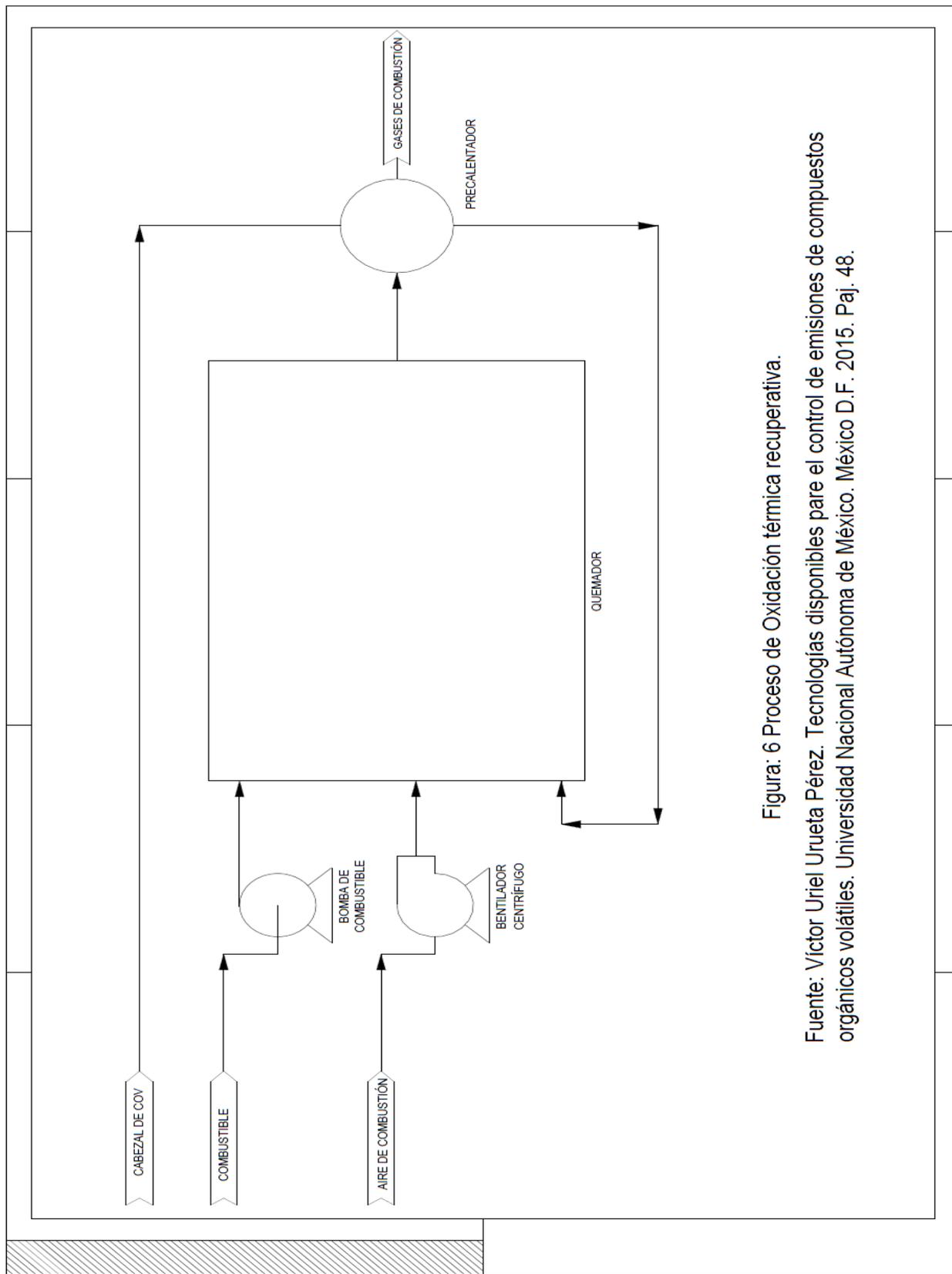


Figura: 6 Proceso de Oxidación térmica recuperativa.
Fuente: Víctor Uriel Urueta Pérez. Tecnologías disponibles para el control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 2015. Paj. 48.

3.3.5.2 Oxidación térmica regenerativa

Se caracteriza por incluir dispositivos, llamados regeneradores o cámaras cerámicas, que recuperan el calor de los gases depurados. Estos regeneradores son unos elementos de material cerámico que acumulan el calor de los gases que salen de la cámara de oxidación.

Mediante un sistema de válvulas se establecen ciclos de funcionamiento consecutivos por los cuales los gases depurados que están a una temperatura elevada (aproximadamente a 700 - 1000 °C), ceden su calor a las masas cerámicas para que los gases contaminados que entran fríos tomen de ellas este calor en el ciclo siguiente.

Con estos equipos se consigue un mínimo consumo de combustible, ya que permite eficacias de recuperación de calor muy elevadas y sus costos de explotación y mantenimiento resultan muy bajos. Cabe destacar también la alta eficacia de depuración, fiabilidad y duración del equipo.

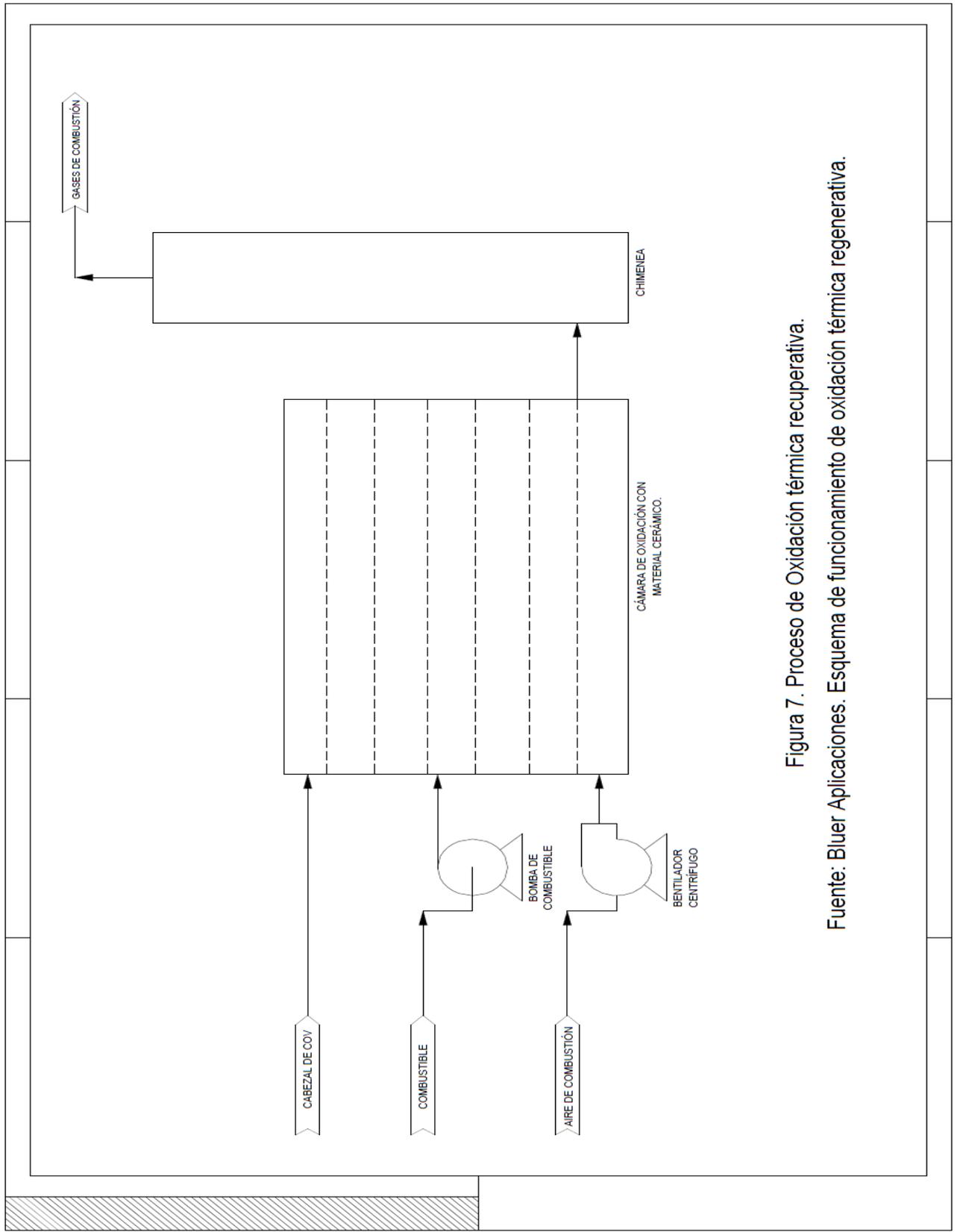


Figura 7. Proceso de Oxidación térmica recuperativa.

Fuente: Bluer Aplicaciones. Esquema de funcionamiento de oxidación térmica regenerativa.

3.3.6 Oxidación catalítica

La oxidación catalítica es similar a la oxidación térmica, sin embargo, un catalizador dentro del sistema disminuye la energía de activación requerida para la oxidación total por lo que ésta ocurre a temperaturas menores. Estos sistemas se utilizan cuando la concentración de los vapores orgánicos es menor del 25% de su límite inferior de explosividad, ya que con concentraciones mayores se pueden alcanzar altas temperaturas y dañar el catalizador.

Las temperaturas de operación se encuentran entre los 750 - 1200 °C, y comúnmente los catalizadores utilizados en la oxidación de este tipo incluyen óxidos metálicos de platino, paladio o rodio, también pueden ser utilizados materiales como el pentóxido de vanadio, el dióxido de titanio o el dióxido de manganeso.

Los costos del combustible en estos sistemas son más bajos y en algunos casos es posible operar sin combustible, excepto durante el arranque; sin embargo, el catalizador tiene un precio elevado y una vida útil que debe considerarse.

Los gases a depurar deben ser calentados hasta alcanzar la temperatura de funcionamiento del catalizador. El calor necesario es suministrado por un quemador a gas o un calentador eléctrico auxiliar. Para reducir el consumo energético, puede instalarse un precalentador que aproveche el calor de los gases ya depurados.

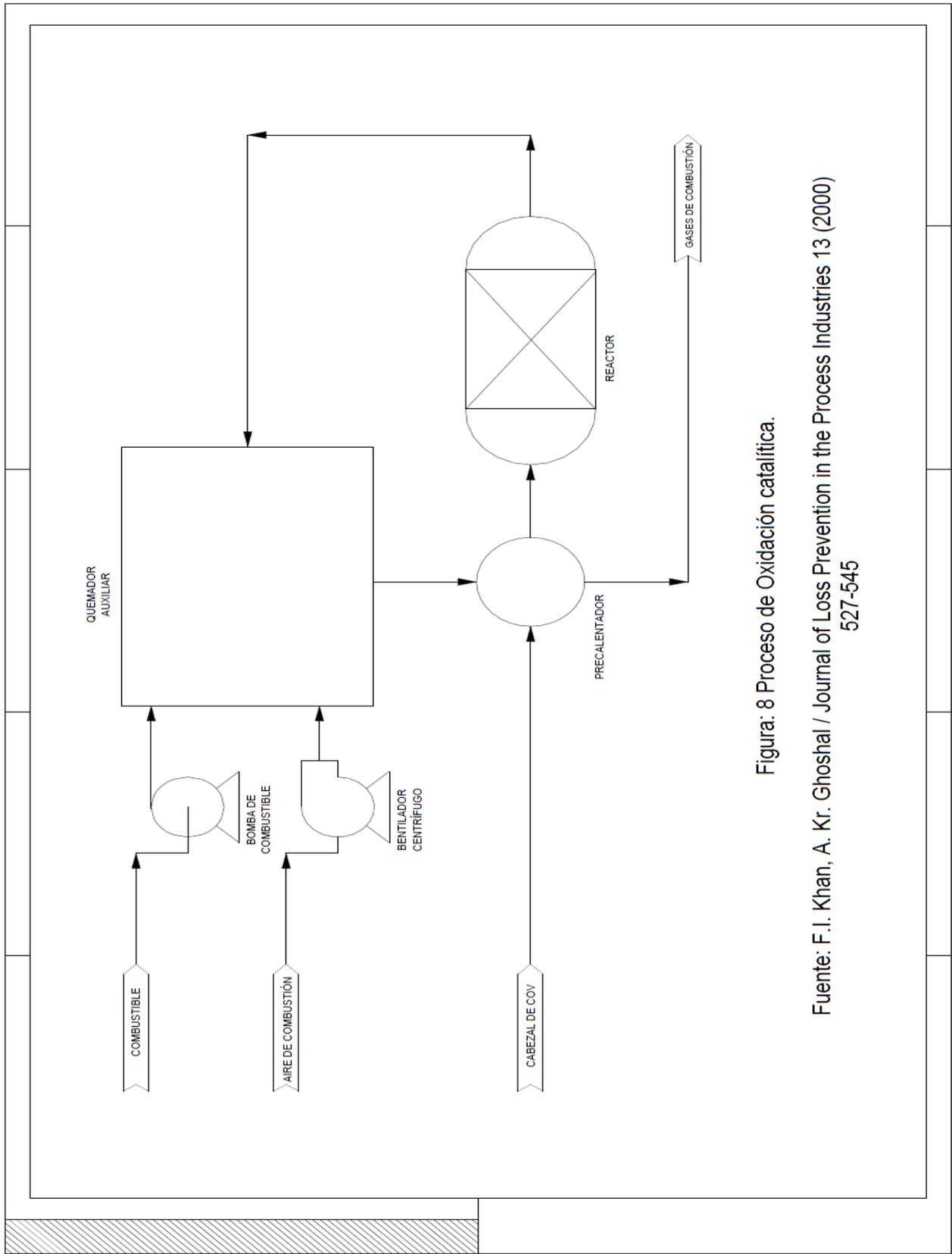


Figura: 8 Proceso de Oxidación catalítica.

Fuente: F. I. Khan, A. Kr. Ghoshal / Journal of Loss Prevention in the Process Industries 13 (2000) 527-545

3.1.1.1 Biofiltración.

Es un proceso biológico utilizado para el control de COV contenido en corrientes de vapores, donde los microorganismos presentes son los responsables de la degradación biológica de los COV. El uso de este proceso implica la producción de biomasa y la oxidación del contaminante.

Este tipo de sistemas requieren que los vapores tengan características especiales, por tal motivo es necesario dar un pretratamiento a las corrientes de entrada al sistema, que conciten de lo siguiente:

- Remoción de polvo, grasas o aerosoles por medios filtrantes o lavado para prevenir el taponamiento del biofiltro.
- Los vapores se preparan y ajustan a una humedad relativa cercana al 100%, esto con el fin de que el biofiltro húmedo no se seque.
- La temperatura de los vapores no debe exceder los 40°C.

Posterior al pretratamiento de COV, los vapores deberán pasar a través del material filtrante, donde los contaminantes y nutrientes serán transferidos a los microorganismos para ser degradados y transformados en componentes más sencillos. El metabolismo biológico proporciona a los microorganismos carbono y energía adicional para su crecimiento y reproducción.

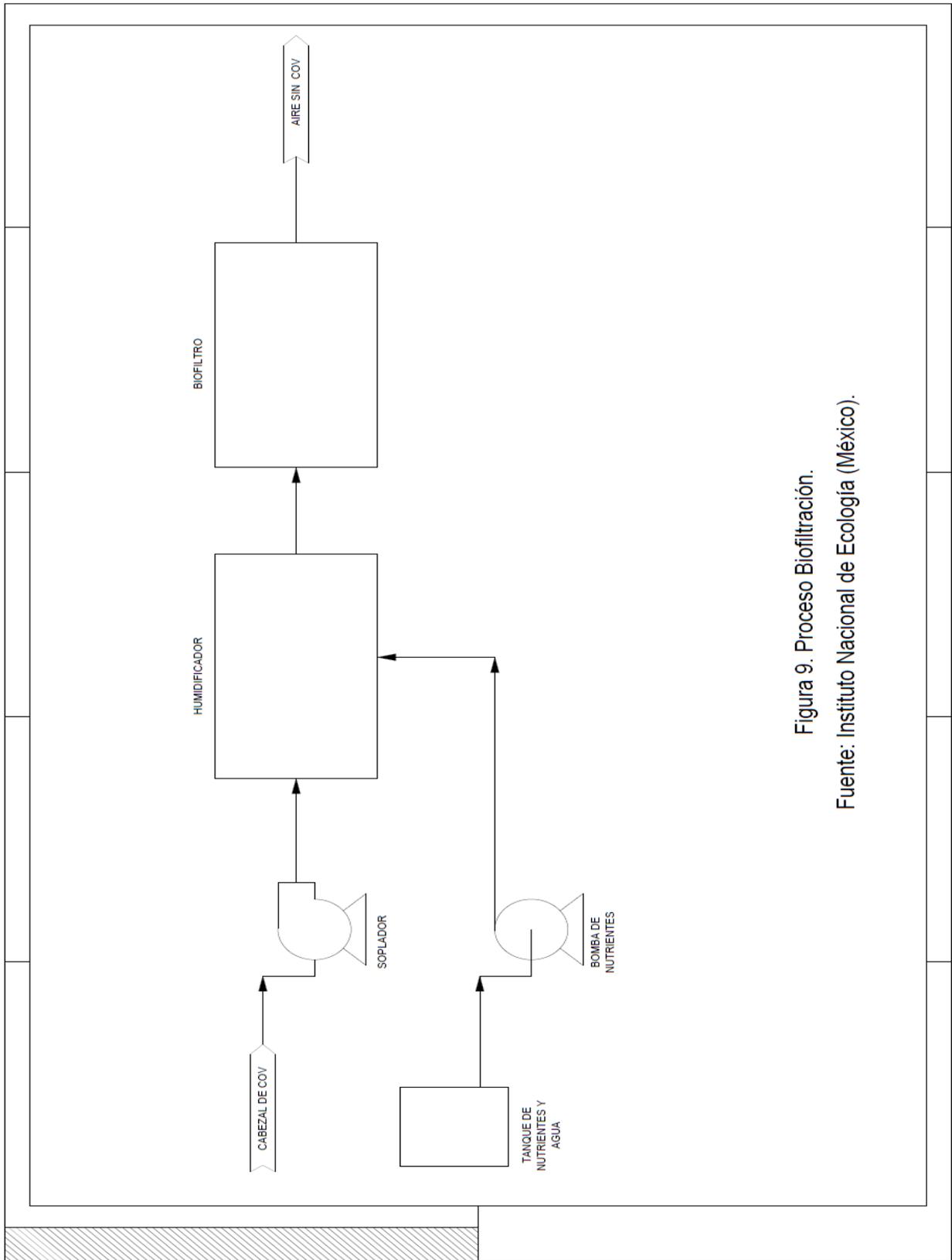


Figura 9. Proceso Biofiltración.
Fuente: Instituto Nacional de Ecología (México).

3.2 Matriz comparativa de alternativas tecnológicas

A continuación se muestran las características propias de cada tecnología en los siguientes ámbitos:

- Tratamiento de COV
- Requerimientos operativos
- Seguridad
- Mantenimiento
- Proveedores de la tecnología de tratamiento de COV.
- Ventajas y desventajas de cada tecnología para el tratamiento de COV.

Exponer las características de cada tecnología en distintas áreas, ayudara a centrar las bases para elaborar los criterios de evaluación que permitan seleccionar la mejor alternativa tecnológica para el caso de estudio.

La presentación matricial de las características de cada tecnología permite comparar de forma rápida y eficiente los beneficios de cada tecnología, con el fin de tener un panorama general de los beneficios y desventajas de cada tecnología.

3.2.1 Tratamiento de COV

De acuerdo a las necesidades planteadas en el caso de estudio, la tecnología de tratamiento de COV, debe tener una generación máxima de 10 mg de COV por cada litro de combustible cargado, por tal motivo se exponen una comparación de la generación de COV, con las eficiencias de tecnologías reportadas por proveedores del mercado (Tabla 10 Tratamientos de COV de las distintas tecnologías de las tecnologías de tratamiento de COV) La comparación se realiza considerando la operación simultanea de las 17 llenaderas de la TAR (592.19 mg de COV por litro de combustible cargado).

Tabla 10) Tratamientos de COV de las distintas tecnologías de las tecnologías de tratamiento de COV.

Tecnología	Eficiencia	Eficiencia evaluada a 592.19⁴ mg de COV / L de combustible cargado
Requerimiento de la Terminal	-	mg de COV / L de combustible cargado
Adsorción - Absorción	95 - 99 %	29.61 - 5.9
Compresión mecánica	70 - 90 %	177.66 - 59.2
Condensación criogénica	50 - 99%	296.10 - 5.9
Absorción membranas Adsorción	Hasta 99.9%	5.92
Condensación por compresión mecánica membranas	Hasta 95%	≥ 29.6
Oxidación térmica regenerativa	Mayor al 99 %	< 5.9
Oxidación térmica recuperativa	Mayor al 99 %	< 5.9
Oxidación catalítica	90 - 99 %	29.61 - 5.9
Biofiltración	60 - 95%	29.61 - 29.6

⁴ En adelante 1560 m³/h.

3.2.2 Requerimientos operativos

En esta sección se presenta en la Tabla 11 Requerimientos de proceso de las tecnologías de tratamiento de COV, los distintos requerimientos operativos de cada tecnología. Entre los elementos presentados se encuentra el rango de flujo volumétrico de COV en el cual puede operar la tecnología, el intervalo de concentración de COV aplicable de cada, el intervalo de temperatura de operación del proceso, los agentes químicos requeridos por el proceso, los servicios auxiliares requeridos por cada tecnología y el listado de equipos correspondiente al proceso relacionado con cada tecnología. Sumado a esta comparación se presentan el flujo y concentración máximo de COV generados por la TAR.

Tabla 11) Requerimientos de proceso de las tecnologías de tratamiento de COV.

Tecnología	Flujos (m³/h)	Temperatura de operación (°C)	Uso de agentes químicos
Características de la terminal	1560 ⁵	T. Ambiente de: -5 – 37.8	-
Adsorción - Absorción	170 - 100000	Ambiente El carbón activado puede presentar puntos calientes	Carbón activado
Compresión mecánica	170 - 34000	Ambiente	No aplica
Condensación criogénica	170 - 34000	Mínima de -190	Refrigerante
Absorción membranas Adsorción	170 - 100000	Ambiente El carbón activado puede presentar puntos calientes	Carbón activado
Condensación por compresión	170 - 34000	Ambiente	No aplica

⁵ El valor de cálculo corresponde a 1554.11 m³/h, pero para el caso de estudio se redondeara a 1560 m³/h.

Tecnología	Flujos (m ³ /h)	Temperatura de operación (°C)	Uso de agentes químicos
mecánica membranas			
Oxidación térmica regenerativa	175 - 34000	750 -1200	No aplica
Oxidación térmica recuperativa	176 - 34000	700 - 1000	No aplica
Oxidación catalítica	20 - 1400	315 - 427	Catalizadores personalizados
Biofiltración	178 - 34000	10 - 40	No aplica

Tabla 12) Servicios auxiliares y equipos de las tecnologías de tratamiento de COV.

Requerimientos Operativos	Servicios auxiliares	Equipos
Adsorción - Absorción	-Medio absorbente (Diésel o gasolina). -Nitrógeno para inertización de lechos de carbón. -Consumo eléctrico de motores de bombas.	<ul style="list-style-type: none"> • Dos tanques adsorbentes con lechos de carbón activado. • Bomba de vacío de tornillo seco. • Torre de absorción. • Bombas de alimentación y retorno de gasolina.
Compresión mecánica	-Refrigerante -Consumo eléctrico de motores de bombas y compresores.	<ul style="list-style-type: none"> • Compresor. • Condensador. • Bomba de transferencia de condensados. • Equipo auxiliar (separador).
Condensación criogénica	-Nitrógeno -Consumo eléctrico de motores de bombas y compresores.	<ul style="list-style-type: none"> • Condensadores • Equipo paquete de enfriamiento de nitrógeno. • Bomba de transferencia de condensados. • Tanques de recuperados.

Requerimientos Operativos	Servicios auxiliares	Equipos
Adsorción membranas Absorción	-Medio absorbente (Diésel o gasolina). -Nitrógeno para inertización de lechos de carbón. -Consumo eléctrico de motores de bombas.	<ul style="list-style-type: none"> • Dos tanques adsorbentes con lechos de carbón activado. • Bombas de vacío de tornillo seco. • Torre de absorción. • Bombas de alimentación y retorno de gasolina. • Modulo de membranas.
Condensación por compresión mecánica membranas	-Refrigerante -Consumo eléctrico de motores de bombas y compresores.	<ul style="list-style-type: none"> • Compresor. • Condensador. • Bombas de transferencia de condensados. • Equipo auxiliar (separador). • Modulo de membranas.
Oxidación térmica regenerativa	-Eventualmente consumo de combustible y consumo eléctrico de motores de bombas.	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba para combustible. • Intercambiador de calor que permita precalentar los gases de entrada. • Quemador. • Ventilador centrífugo.
Oxidación térmica recuperativa	-Eventualmente consumo de combustible y consumo eléctrico de motores de bombas.	<ul style="list-style-type: none"> • Cámaras rellenas de material cerámico. • Cámara de oxidación. • Ventilador centrífugo. • Bomba para combustible. • Chimenea.
Oxidación catalítica	-Consumo de combustible y consumo eléctrico de motores de bombas y soplador para precalentado.	<ul style="list-style-type: none"> • Quemador auxiliar. • Reactor. • Precalentador. • Ventilador centrífugo • Bomba para combustible.
Biofiltración	-Consumo eléctrico de motor de bomba Agua.	<ul style="list-style-type: none"> • Soplador. • Bomba centrífuga. • Humidificador. • Tanque para la solución de nutrientes. • Biofiltro.

3.2.3 Seguridad

Entre los requerimientos planteados en el caso de estudio se hace mención a los requerimientos de seguridad, que incluyen la protección contra incendio. En este apartado se exponen los riesgos de incendio inmanentes a cada tecnología en una escala de riesgo moderado, riesgo bajo y aquellas sin riesgo de incendio.

Adicionalmente se exponen los posibles riesgos a la salud por el manejo de algún agente químico en el proceso de tratamiento de COV y el grado de intervención humana dentro del proceso por medio del nivel de automatización del proceso.

Tabla 13) Grado de automatización, riesgos a la salud y riesgo de incendio en las tecnologías de tratamiento de COV.

Tecnología	Grado de automatización.	Riesgos a la salud.	Riesgos de incendio.
Adsorción - Absorción	Automatizado	Ninguno	Bajo: debido a la generación de puntos calientes en los lechos de carbón.
Compresión mecánica	Automatizado	Ninguno	Ninguno
Condensación criogénica	Automatizado	Ninguno	Ninguno
Adsorción membranas Absorción	Automatizado	Ninguno	Bajo: debido a la generación de puntos calientes en los lechos de carbón.
Condensación por compresión mecánica membranas	Automatizado	Ninguno	Ninguno

Tecnología	Grado de automatización.	Riesgos a la salud.	Riesgos de incendio.
Oxidación térmica regenerativa	Automatizado	Ninguno	Moderado: debido a la oxidación térmica del proceso.
Oxidación térmica recuperativa	Automatizado	Ninguno	Moderado: debido a la oxidación térmica del proceso.
Oxidación catalítica	Automatizado	El uso de catalizadores, puede generar problemas a la salud	Moderado: debido a la reacción exotérmica del proceso.
Biofiltración	Supervisorio	Ninguno	Ninguno

3.2.4 Mantenimiento

Como parte de los requerimientos de la terminal, se ve la necesidad de considerar los distintos mantenimientos que requieren las tecnologías de tratamiento de COV. En la tabla 14 Mantenimientos y tiempo de vida media de las tecnologías de tratamiento de COV, se muestra el tipo de mantenimiento que se debe realizar para cada tecnología y la frecuencia con el que se debe realizar cada uno de ellos. También se enlista el tiempo de vida media de cada tecnología considerando un mantenimiento adecuado.

Tabla 14) Mantenimientos y tiempo de vida media de las tecnologías de tratamiento de COV.

Tecnología	Tipo de mantenimiento	Frecuencia del mantenimiento	Tiempo de vida media
Adsorción - Absorción	Preventivo	Cada 4 meses	20 años
Compresión mecánica	Preventivo	Periodos de 3, 6 o 12 meses.	15 años
Condensación criogénica	Preventivo	Cada 4 meses	20 años
Adsorción membranas Absorción	-Preventivo -Limpieza	Módulo de Absorción: Cada 4 meses Membrana: Limpieza al registrar emisiones elevadas	-Módulo de Absorción: 20 años -Membrana: 3 - 5 años
Condensación por compresión mecánica membranas	-Preventivo -Limpieza	-Módulo de Condensación: Cada 3 meses -Membrana: Limpieza al registrar emisiones elevadas	-Módulo de Condensación: 15 años -Membrana: 3 - 5 años
Oxidación térmica regenerativa	Preventivo	De 4 - 6 meses	15 - 20 años
Oxidación térmica recuperativa	Preventivo	De 4 - 6 meses	15 - 20 años

Tecnología	Tipo de mantenimiento	Frecuencia del mantenimiento	Tiempo de vida media
Oxidación catalítica	-Preventivo -Remplazo de catalizador	De 4 - 6 meses	-Reactor: 10 años -Catalizador: 8000 - 20000 horas
Biofiltración	Rutinario	Se debe ajustar: pH de, temperatura de biofiltro y la humedad de vapores de entrada al sistema, cada vez que sea requerido.	3 - 5 años El medio orgánico debe remplazarse cada 3 años como máximo.

3.2.5 Proveedores de la tecnología de tratamiento de COV.

Un aspecto importante a considerar es la disponibilidad para conseguir la tecnología de tratamiento de COV, conseguir una tecnología con un proveedor internacional puede dificultar tramites de transporte y adquisición de la tecnología, al igual que la facilidad de adquirir repuestos y mantenimientos necesarios para la tecnología. En la Tabla 15 Proveedores de la tecnologías para el tratamiento de COV, se enlistan aspectos, simples pero fundamentales para la adquisición de una tecnología y que pueden adquirir gran importancia al momento de operar el proceso o al realizar un mantenimiento.

Tabla 15) Proveedores de la tecnologías para el tratamiento de COV.

Tecnología	Proveedor	Proveedores con representante nacional	Facilidad de otorgar mantenimiento	Capacitación para el manejo de equipos de tratamiento de COV
Adsorción - Absorción	-JORDAN TECHNOLOGIES* -JOHN ZINK* -CARBOVAC ENVIRONMENTAL SERVICES* -GRUPO ROCAF*	Sí	Sí	Sí
Compresión mecánica	-EXTERRAN -HY-BON'S	No	No	-
Condensación criogénica	-EDWARDS ENGINEERING, CHILLER SOLUTIONS* -INTERNATIONAL PROCESS	Sí	Sí	Sí

Tecnología	Proveedor	Proveedores con representante nacional	Facilidad de otorgar mantenimiento	Capacitación para el manejo de equipos de tratamiento de COV
	PLANTS -PETROGAS SYSTEMS			
Adsorción membranas Absorción	-MEMBRANE TECHNOLOGY AND RESEARCH, INC -GMT MEMBRANTECHNIK GMBH	No	No	-
Condensación por compresión mecánica membranas		No	No	-
Oxidación térmica regenerativa	-PRODESA MEDIOAMBIENTE -GLENRO INC. -ZEECO* -MEGTEC -HI TEMP TECHNOLOGY CORPORATION -ADWESTTECHNOLOGIES INC. -MET-PRO ENVIRONMENTAL AIR SOLUTIONS	Sí	Sí	-
Oxidación térmica recuperativa		Sí	Sí	-
Oxidación catalítica	-JOHNSON MATTHEY -UOP -ECOTEC -ANGUIL ENVIRONMENTAL SYSTEMS, INC.	No	No	-
Biofiltración	-AIR & WATER SOLUTIONS, INC -BOHN BIOFILTER CORPORATION -PURE AIR SOLUTIONS	No	No	-

* Proveedor con representante nacional.

3.2.6 Ventajas y desventajas de cada tecnología para el tratamiento de COV.

A continuación se presentan las distintas ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías de tratamiento de COV.

Tabla 16) Ventajas y Ventajas y desventajas de cada tecnología para el tratamiento de COV.

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Adsorción - Absorción	<ul style="list-style-type: none"> -El sistema funciona de forma continua. -El sistema es totalmente automático. -Es óptimo para la recuperación de hidrocarburos. -Sistema flexible para el manejo de múltiples composiciones de COV, al variar el tipo de carbón activado. 	<ul style="list-style-type: none"> -El carbón activado puede generar puntos calientes. -Se pierde eficiencia con la humedad del aire.
Compresión mecánica	<ul style="list-style-type: none"> -El proceso no genera desechos Sólidos o líquidos -El refrigerante no se contamina con las sustancias a tratar. -Se pueden recuperar hidrocarburos. -El sistema es totalmente automático. 	<ul style="list-style-type: none"> -Las unidades de recuperación de vapor tienen que estar cuidadosamente diseñado para satisfacer la especificación del cliente. -Se cuenta con malas experiencias operativas. -Se requiere un monitoreo riguroso de las condiciones de entrada del proceso.. -Mantenimiento constante al compresor. -Se presentan problemas de tratamiento al variar la composición de COV.
Condensación criogénica	<ul style="list-style-type: none"> -El proceso no genera desechos Sólidos o líquidos -El refrigerante no se contamina con las sustancias a tratar. -Se pueden recuperar hidrocarburos. -El sistema es totalmente automático. 	<ul style="list-style-type: none"> -El flujo de vapores que entra en el condensador debe estar libre de humedad para evitar la formación hielo que entorpece la transferencia de calor. -En los condensadores por contacto, el refrigerante no puede volver a ser usado directamente en el sistema sin

Tecnología	Ventajas	Desventajas
		<p>pasar por un proceso de separación adicional.</p> <p>-Puede existir bloqueo en la salida del intercambiador motivado por la congelación de los COV.</p>
<p>Adsorción membranas Absorción</p>	<p>-El sistema funciona de forma continua.</p> <p>-El sistema es totalmente automático.</p> <p>-Es óptimo para la recuperación de hidrocarburos.</p> <p>-Sistema flexible para el manejo de múltiples composiciones de COV.</p> <p>-Se obtienen las emisiones más bajas de COV.</p>	<p>-La mayoría de proveedores se encuentran en Alemania, lo cual impide realizar mantenimientos directamente con el proveedor.</p>
<p>Condensación por compresión mecánica membranas</p>	<p>-El proceso no genera desechos Sólidos o líquidos</p> <p>-El refrigerante no se contamina con las sustancias a tratar.</p> <p>-Sistema flexible para el manejo de múltiples composiciones de COV.</p> <p>-Se pueden recuperar hidrocarburos.</p> <p>-Se obtienen emisiones más bajas de COV.</p> <p>-El sistema es totalmente automático.</p>	<p>-La mayoría de proveedores se encuentran en Alemania, lo cual impide realizar mantenimientos directamente con el proveedor.</p>
<p>Oxidación térmica regenerativa</p>	<p>-Facilidad de operación.</p> <p>-Facilidad de instalación.</p> <p>-Permite trabajar amplios rangos de concentraciones y flujos con adecuadas medidas de seguridad.</p> <p>-Posibilidad de valorización energética de residuos gaseosos.</p> <p>-Sistema flexible para el manejo de múltiples composiciones de COV.</p> <p>-El sistema es totalmente automático.</p>	<p>-Altos costos de operación con bajas concentraciones de COV.</p> <p>-Problemas de ignición o explosión.</p> <p>-Emisiones de óxidos productos de la combustión a la atmosfera.</p> <p>-Se tiene un mal concepto de esta tecnología por el riesgo de incendio.</p> <p>-Actualmente ninguna terminal del país cuenta con esta tecnología.</p>
<p>Oxidación térmica recuperativa</p>	<p>-Mínimo consumo de combustible, ya que permite eficacias de recuperación de calor muy elevadas.</p> <p>-Facilidad de operación.</p> <p>-Facilidad de instalación.</p> <p>-Permite trabajar amplios rangos de concentraciones y flujos con adecuadas medidas de seguridad.</p> <p>-Sistema flexible para el manejo de múltiples composiciones de COV.</p> <p>-El sistema es totalmente automático.</p>	<p>-Problemas de ignición o explosión.</p> <p>-Emisiones de óxidos productos de la combustión a la atmosfera.</p> <p>-Se tiene un mal concepto de esta tecnología por el riesgo de incendio.</p> <p>-Actualmente ninguna terminal del país cuenta con esta tecnología.</p>

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Oxidación catalítica	<ul style="list-style-type: none"> -Baja caída de presión. -Equipos compactos. -Flexibilidad en el tratamiento de COV, con catalizadores personalizados. -Tiempo de instalación rápido. -Menores requisitos de combustible. -Emisiones reducidas de CO y de NOx. -El sistema es totalmente automático. 	<ul style="list-style-type: none"> -Problemas de ignición o explosión. -No recomendable debido a la gran cantidad de catalizador requerido en los procesos debido a la pérdida de actividad. -Difícil tratamiento de los catalizadores envenenados. -Altos costos de catalizadores. -Actualmente ninguna terminal del país cuenta con esta tecnología.
Biofiltración	<p>Manejo sencillo de los desechos producidos en el proceso.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Requiere de un pretratamiento el agua usada en el proceso de biofiltración para el mantener un pH de 7. -Estricto control de la temperatura y humedad en el biofiltro. -Baja adaptación a fluctuaciones del flujo de los vapores a tratar. -Este sistema no puede trabajar de manera intermitente. -Se requiere un cultivo mixto de microorganismos sin la recuperación de este material. Los fabricantes son responsables de la selección y el suministro de los microorganismos. -No se cuenta con gran referencia de este sistema utilizado en el tratamiento de vapores de hidrocarburos, esta tecnología principalmente ha sido utilizada para el tratamiento de olores. -Actualmente ninguna terminal del país cuenta con esta tecnología.

3.3 Criterios de evaluación

De acuerdo a los requerimientos abordados en el caso de estudio, es necesario realizar una devaluación del cumplimiento de los ámbitos de:

- Tratamiento de COV
- Requerimientos operativos.
- Seguridad
- Mantenimiento
- Proveedores de la tecnología de tratamiento de COV.
- Ventajas y desventajas de cada tecnología para el tratamiento de COV.

A continuación se presentan los criterios de evaluación para cada una de las tecnologías descritas en el numeral 3.2 “Descripción de las principales tecnologías disponibles en el mercado para el control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV)”, los cuales están diseñados para asegurar que la tecnología seleccionada, cumpla con todos los requerimientos de la terminal.

3.3.1 Listado de los criterios de evaluación de la terminal de almacenamiento y reparto.

De acuerdo a las necesidades de la terminal, los criterios de evaluación se dividirán en 7 categorías:

- Criterios de generación de COV.
- Criterios de seguridad.
- Criterios relacionados con el proveedor.
- Criterios de tratamiento de COV.
- Criterios relacionados con las necesidades específicas de la terminal.
- Otros criterios.

3.3.1.1 Criterios de generación de COV.

Los criterios de generación de COV, son fundamentales para la adquisición de una tecnología que se encargue de su tratamiento. Para ello se considerará la normatividad aplicable en este ámbito.

Como se mencionó con en el numeral 3.1.1.1.4 “Criterios de diseño”, el sistema de tratamiento de COV, no debe de generar más de 10 mg de COV por cada litro de combustible cargado, por tal motivo las tecnologías deberán cumplir con este requisito para su adquisición.

En la actualidad no se cuenta con alguna normatividad nacional vigente, que regule las emisiones de COV a la atmosfera, no obstante la NOM-0892-SEMANRNAT-1995, establece en el numeral 4.5: *La “eficiencia en sitio” del sistema de recuperación de vapores de gasolina debe ser superior al 80% (ochenta por ciento) en promedio comprobada, incluyendo las emisiones asociadas con los tanques de almacenamiento y en su caso a través de las unidades de procesamiento de vapores excedentes. Dicha eficacia será evaluada con el procedimiento y el equipo previsto en la Norma Oficial Mexicana que se expida para el efecto.* Dicho parámetro puede ser útil para la evaluación del sistema de tratamiento de COV, cabe resaltar que la NOM-0892-SEMANRNAT-1995, fue cancelada el día 26 de enero de 2012, por la Secretaria de medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT).

Uno de los objetivos de la instalación de un sistema de tratamiento de COV, es reducir el nivel emisiones de COV a la atmosfera, no obstante se debe considerar que la emisión de CO₂ es un problema para el ambiente. De acuerdo a la Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, en su última reforma del 09 de Enero de 2015, se expresa en el Capítulo II Artículo 113, *“No deberán emitirse contaminantes a la atmósfera que ocasionen o puedan ocasionar desequilibrios*

ecológicos o daños al ambiente. En todas las emisiones a la atmósfera, deberán ser observadas las previsiones de esta Ley y de las disposiciones reglamentarias que de ella emanen, así como las normas oficiales mexicanas expedidas por la Secretaría". Debido a lo indicado por la Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, se preferirán aquellas tecnologías que no generen otro tipo de emisiones. Cabe resaltar que los productos distribuidos por la TAR, tienen la finalidad de servir como combustibles, por lo cual de alguna u otra manera dichos combustibles terminaran siendo reducidos a productos de combustión, por tal motivo, el no cumplimiento de este criterio, no es motivo de descarte para la tecnología que emita productos de combustión.

No obstante, aunque el producto final de la combustión de hidrocarburos es CO₂ y gases de efecto invernadero, la emisión de COV, contiene compuestos cancerígenos (Principalmente por compuestos aromáticos) que exponen a la población a contraer cáncer en las vías respiratorias, convirtiéndolos en un agente de riesgo superior.

3.3.1.2 Criterios de proceso.

Se considera para la selección de criterios de procesos, las condiciones de operación de la tecnología y se preferirá aquellas en las que el proceso opere en las condiciones más cercanas al ambiente. Es preferible que un proceso trabaje en condiciones ambientales debido a que esto reducirá el consumo de los servicios auxiliares y consumo de energía. De igual forma se evaluará si la tecnología tiene la capacidad de manejar los flujos y concentraciones de COV emitidos por la TAR.

En la evaluación se le dará preferencia a las tecnologías que tengan un menor consumo de servicios auxiliares.

Los siguientes dos criterios de operación son de vital importancia, y el no cumplimiento de ellos, puede ocasionar el descarte de la tecnología:

- La tecnología debe tener la capacidad de tratar flujos de COV de 1560 m³/h: Debido a que este es el máximo flujo volumétrico de COV que puede emitir la TAR, es de vital importancia que la tecnología seleccionada, tenga la capacidad para tratar este flujo de COV, de lo contrario, la tecnología no es adecuada para la terminal.

Los siguientes criterios, son flexibles en cuanto a su cumplimiento y aquellas tecnologías que los cumplan serán favorecidas para la posterior evaluación tecnológica.

- La tecnología debe operar a temperatura ambiente: Al realizar una operación a temperatura ambiente, se reducen los consumos energéticos de combustible y/o energía eléctrica, reflejándose en un mejor costo operativo.
- La tecnología debe tener bajo consumo de refrigerantes: Es preferible evitar el uso de refrigerantes, debido a que esto disminuirá los costos de operación.
- La tecnología debe tener bajo consumo eléctrico: Es preferible evitar el alto consumo de energía eléctrica, debido a que esto disminuirá los costos de operación.
- La tecnología debe tener bajo consumo de combustible: Es preferible evitar el consumo de combustibles, debido a que esto disminuirá los costos de operación y evitará emisiones de productos de combustión.

3.3.1.3 Criterios de seguridad.

La seguridad en la operación de cualquier proceso, es fundamental para su buen funcionamiento y para la protección de los operarios de la terminal, por tales motivos se consideraran los siguientes criterios para asegurar que la tecnología seleccionada no representa un riesgo significativo para el personal de la TAR:

- Nivel de riesgo de incendio en el proceso: Debido a que en la TAR, se manejan una serie de productos que pueden incendiarse a bajas temperaturas y presión atmosférica, se preferirán aquellas tecnologías que tengan un bajo riesgo de incendio.
- Toxicidad de agentes químicos usados en el proceso: Para evitar exponer al personal de la terminal a sustancias que puedan ser nocivas para su salud, se preferirán las tecnologías que cuenten con la menor cantidad de agentes químicos en su proceso.
- Uso de equipos elevados: De acuerdo al procedimiento crítico para la prevención de caídas (400-GCSIPA-PO-14), se define como trabajo de altura, a todos los trabajos que se realicen a una altura de 1.8 metros o más a partir del nivel de piso, midiendo a partir del nivel de piso terminado. Por tal motivo es preferible una tecnología que no requiera el uso de trabajos elevados en su mantenimiento.

3.3.1.4 Criterios relacionados con el proveedor.

Uno de los aspectos críticos para la selección de una tecnología, es la consideración de un proveedor adecuado de la misma. Experiencias operativas de otras terminales, señalan que algunas unidades recuperadoras de vapor instaladas entre el año 1997 y 2001, dejaron de dar servicio a distintas terminales debido a la falta de mantenimiento y la imposibilidad de contactar a los fabricantes de dichas tecnologías. En esta sección se analizarán algunos aspectos importantes para la

selección de una tecnología, teniendo como referencia al proveedor o fabricante de la misma.

- Existencia de múltiples proveedores: En lo posible, es preferible contar con múltiples proveedores de la tecnología seleccionada. Esto favorece la ampliación de ofertas comerciales y permite la selección de un proveedor que se ajuste a las necesidades de la terminal.
- Representantes nacionales de la tecnología: Un aspecto importante en la selección de un proceso o equipo, es la facilidad de contactar al proveedor de tecnología o a su fabricante. El contar con un representante nacional garantiza en cierta medida, el contacto eficiente para realizar la adquisición de la tecnología, realizar mantenimientos y conseguir refacciones originales para los equipos, que garanticen el funcionamiento óptimo de la tecnología seleccionada.
- Facilidad del proveedor para realizar mantenimientos: En algunos casos los proveedores de tecnológicos, se dedican únicamente a la venta y transporte de tecnología, lo cual ocasiona que la realización de mantenimientos rutinarios sea difícil de conseguir. Por consecuencia la tecnología deja de operar antes del tiempo de vida estimado en su adquisición. Por tal motivo es de gran importancia contar con un proveedor que garantice el mantenimiento de si tecnología.
- Facilidad del proveedor para ofrecer refracciones: La posibilidad de conseguir refacciones para los equipos de procesos es un factor fundamental para el buen funcionamiento de cualquier proceso. Es importante considerar que el proveedor de la tecnología, debe tener la capacidad para ofrecer refacciones para sus equipos por un periodo de tiempo igual a la vida operativa de sus equipos. En algunos casos, las tecnologías para el tratamiento de COV, se han descontinuado debido al avance tecnológico, impidiendo la adquisición de refacciones originales.

- De acuerdo al numeral 3.1.1.1.6 “Requerimientos de capacitación”, se requiere que el proveedor de la tecnología, brinde capacitación para poder operar el sistema de tratamiento de COV
- De acuerdo al numeral 3.1.1.1.8 “Garantías”, el proveedor deberá de garantizar el equipo, los controles y accesorios del nuevo sistema de tratamiento de COV, contra defectos de fabricación, falla, mala instalación o diseño impropio, por un periodo mínimo de 24 meses después de haber puesto el sistema en operación.

3.3.1.5 Criterios de tratamiento de COV.

Como se mencionó en el numeral 3.2 “Descripción de las principales tecnologías disponibles en el mercado para el control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV)”, existen dos tipos de tecnologías para el tratamiento de COV (tecnologías destructivas y recuperativas). Para la posterior evaluación, se preferirán a aquellas tecnologías que sean del tipo recuperativas, ya que estas dan la posibilidad de recuperar producto para su venta. A continuación se presentan los criterios de evaluación para el tratamiento de COV.

- Capacidad para recuperar COV: Como se mencionó enteramente se preferirían las tecnologías del tipo recuperativo.
- Capacidad para tratar COV con distintas composiciones: Como criterio de diseño se debe diseñar la tecnología con la composición de la Tabla 3) Composición típica de Vapores de Gasolina, no obstante se prevé la necesidad de que la tecnología sea capaz de tratar y/o recuperar COV, con distintas composiciones. Esto se debe a la variación de composición de los productos recibidos en la TAR.

3.3.1.6 Criterios relacionados con las necesidades específicas de la terminal.

Algunos de los criterios específicos de la TAR que no se han enlistado anteriormente son los siguientes:

- El nuevo sistema de tratamiento de COV debe operar automáticamente y contar con un sistema de control del tipo supervisorio: La automatización del proceso permite que la intervención humana sea lo más baja posible, ayudando a la reducción de riesgos para los operarios.
- El nuevo sistema deberá ser capaz de operar 24 horas al día, los 365 días del año: Debido al factor de servicio de la Terminal, la tecnología debe operar de forma ininterrumpida.
- Capacidad de realizar su arranque y paro de forma automática: La capacidad de arranque u paro automático ayuda a reducir los consumos de energía cuando el equipo no esté operando.
- El sistema de tratamiento debe monitorear y cuantificar la concentración de las su correcto funcionamiento: El monitoreo de las emisiones garantizará que se están obteniendo emisiones de máximas de 10 mg de COV, por cada litro de combustible cargado.

3.3.1.7 Otros criterios

- Tiempo de vida media: Es preferible que la tecnología seleccionada tenga un tiempo de vida media alto, para evitar su remplazo temprano.
- Generación de residuos: Se preferirán las tecnologías que no generen residuos sólidos.
- Frecuencia de los mantenimientos: Se preferirán aquellas tecnologías que requieran mantenimientos poco frecuentes.

3.3.1.8 Resumen de criterios de evaluación

A continuación se presenta el resumen de los criterios de evaluación abordados en esta sección:

1 Criterios de emisión de COV a la atmosfera.

- 1.1 Emisiones de COV con un contenido máximo de 10 mg de COV, por litro de combustible cargado, al final del proceso.
- 1.2 Eficiencia de tratamiento de 80 % como mínimo.
- 1.3 Cumplimiento con la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente Capítulo II Artículo 113.

2 Criterios de proceso.

- 2.1 La tecnología debe tener la capacidad de tratar flujos de COV de 1560 m³/h.
- 2.2 La tecnología debe operar a temperatura ambiente.
- 2.3 La tecnología debe tener bajo consumo de refrigerantes.
- 2.4 La tecnología debe tener bajo consumo eléctrico.
- 2.5 La tecnología debe tener bajo consumo de combustible.

3 Criterios de seguridad.

- 3.1 Nivel de riesgo de incendio en el proceso.
- 3.2 Toxicidad de agentes químicos usados en el proceso.
- 3.3 Uso de equipos elevados.

4 Criterios relacionados con el proveedor.

- 4.1 Existencia de múltiples proveedores.
- 4.2 Representantes nacionales de la tecnología.
- 4.3 Facilidad del proveedor para realizar mantenimientos.
- 4.4 Facilidad del proveedor para ofrecer refracciones.
- 4.5 Facilidad del proveedor para ofrecer capacitación.
- 4.6 Garantías.

5 Criterios de tratamiento de COV.

- 5.1 Capacidad para recuperar COV.
- 5.2 Capacidad para tratar COV con distintas composiciones.

6 Criterios relacionados con las necesidades específicas de la terminal.

- 6.1 El nuevo sistema de tratamiento de COV debe operar automáticamente y contar con un sistema de control del tipo supervisorio.
- 6.2 El nuevo sistema deberá ser capaz de operar 24 horas al día, los 365 días del año
- 6.3 Capacidad de realizar su arranque y paro de forma automática
- 6.4 El sistema de tratamiento debe monitorear y cuantificar la concentración de las emisiones para verificar su correcto funcionamiento.

7 Otros criterios

- 7.1 Tiempo de vida media.
- 7.2 Generación de residuos.
- 7.3 Frecuencia de los mantenimientos.

3.4 Aplicación del modelo de evaluación de alternativas tecnológicas.

Para realizar la evaluación de alternativas tecnológicas se tomara como referencia el documento “Guía Gestión de tecnología para el desarrollo de proyectos de PEMEX 2013-2015, en el cual se establece la ejecución de un modelo de evaluación de alternativas tecnológicas, que consta de las siguientes etapas:

1. Identificación de los requerimientos y especificaciones técnicas del proyecto.
2. Identificación de los requerimientos críticos o indispensables a cumplir por la alternativa tecnológica.
3. Identificación de las especificaciones técnicas del tecnólogo.
4. Elaboración de la Matriz de Evaluación de Alternativas Tecnológicas.
5. Evaluación sencilla de cumplimiento o no cumplimiento.
6. Ponderación de los requerimientos y especificaciones técnicas del proyecto.
7. Evaluación de las alternativas tecnológicas identificadas.
8. Elaboración de la matriz de calificación de alternativas tecnológicas (resultados).
9. Informe del análisis y la evaluación de alternativas tecnológicas.

Las etapas 1, 2, 3 y 4 marcadas en la metodología para la evaluación de alternativas tecnológicas de la Guía Gestión de tecnología para el desarrollo de proyectos de PEMEX 2013-2015, están cubiertas de los numerales 3.1 a 3.5. Las etapas 5, 6, 7, 8 y 9 serán descritas a continuación.

3.4.1 Evaluación sencilla de cumplimiento o no cumplimiento.

De acuerdo al punto 5, de la ejecución del modelo de evaluación de alternativas tecnológicas de la “Guía Gestión de tecnología para el desarrollo de proyectos de PEMEX 2013-2015”, se debe realizar una evaluación sencilla de cumplimiento o no cumplimiento. Para ello se recomienda realizar un filtrado considerando los siguientes criterios, como una etapa previa a la evaluación de las tecnologías:

Aquellas tecnologías que no cumplan los siguientes criterios serán descartadas de la evaluación tecnológica:

- Emisiones de COV con un valor máximo de 10 mg de COV, por litro de combustible cargado, al final del proceso.
- Eficiencia de tratamiento de 80 % como mínimo.
- La tecnología debe tener la capacidad de tratar flujos de COV de 1560 m³/h.

De acuerdo a la tabla 10, Tratamientos de COV de las distintas tecnologías de las tecnologías de tratamiento de COV, las tecnologías de Compresión mecánica, Condensación por compresión mecánica membranas y Biofiltración, permiten una emisión con más de 10 mg de COV, por cada litro de combustible cargado.

De acuerdo a la Tabla 10 Tratamientos de COV de las distintas tecnologías de las tecnologías de tratamiento de COV, todas las tecnologías cumplen con lo indicado en la eficiencia de tratamiento.

Conforme a lo indicado en la Tabla 11 Requerimientos de proceso de las tecnologías de tratamiento de COV, la tecnología de Oxidación catalítica no cuenta con la capacidad para tratar el flujo de 1560 m³/h de COV.

Conforme a lo visto en este filtrado rápido, la tecnología de Oxidación Catalítica, Compresión mecánica, Condensación por compresión mecánica membranas y Biofiltración, saldrán de la evaluación tecnológica.

3.4.2 Ponderación de los requerimientos y especificaciones técnicas del proyecto.

La ponderación de los criterios de evaluación, consiste en la asignación de valores en porcentajes a cada uno de los criterios de evaluación, de tal manera que la suma de cada uno de los porcentajes de un total de 100.

Para realizar la asignación de porcentajes a cada criterio de evaluación, se tomó como base el artículo "*Procedimiento para la evaluación de proveedores mediante técnicas multicriterio*"⁶.

El modelo presentado en dicho artículo, realiza una ponderación que asigna un porcentaje a cada criterio de evaluación y de esta forma, le otorga un mayor peso a los criterios que son de vital importancia para la selección de la alternativa tecnológica más adecuada.

La ponderación del modelo se realiza a través de dos mecanismos preliminares, los cuales en su conjunto asignan un porcentaje, definitivo a cada criterio.

⁶ Procedimiento para la evaluación de proveedores mediante técnicas multicriterio, Scientia et Technica Año X, No 24, Mayo 2004. UTP. ISSN 0122-1701"

El primer mecanismo, está basado en la dispersión de las calificaciones asignadas a cada criterio de evaluación. De esta manera, se consigue una ponderación objetiva, basada a la información técnica de cada alternativa tecnológica. El segundo mecanismo, maneja un análisis de comparación criterio-criterio, en el cual se compara un criterio de evaluación con respecto a los criterios restantes. Al realizar esta comparación, se puede hacer énfasis en los criterios que se consideran más importantes desde un punto de vista técnico.

3.4.2.1 Matriz de evaluación de alternativas tecnológicas.

Como un paso previo a la ponderación de los criterios de evaluación, es necesario realizar una matriz que presente el listado de los criterios obtenidos en la sección 3.5 “Criterios de evaluación”, y se establezca un parámetro medible para cada criterio, con el fin de poder comparar a cada tecnología de forma sencilla. A continuación se ilustra un ejemplo para la asignación del parámetro medible de cada criterio:

De acuerdo a los Criterios de emisión de COV a la atmosfera, la generación máxima permitida de COV al final del tratamiento debe de ser de 10 mg de COV por cada litro de combustible cargado como máximo, se debe tener una eficiencia de tratamiento de OCV de 80 % como mínimo y se debe cumplir con el Artículo 113.del Capítulo II de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, por tal motivo se propone una escala que permita comparar cada tecnología con estos criterios:

Tabla 17) Asignación de parámetro comparativo para Criterios de emisión de COV a la atmosfera.

1 Criterios de emisión de COV a la atmosfera.	Parámetro	
1.1 Emisiones de COV con un valor máximo de 10 mg de COV, por litro de combustible cargado, al final del proceso.	Cumple	No cumple
1.2 Eficiencia de tratamiento de 80 % como mínimo.	Cumple	No cumple
1.3 Cumplimiento con la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente Capítulo II Artículo 113.	Cumple	No cumple

Como se observa en la tabla 17, la asignación del parámetro de comparación es bastante simple y basta con indicar si la tecnología cumple o no con el criterio de evaluación. Para el caso específico de los “Criterios de Seguridad” y “Otros Criterios”, se requiere de la implementación de parámetros de comparación más específicos, los cuales se muestran en las tablas 18 y 19.

Tabla 18) Asignación de parámetro comparativo para Criterios de Seguridad.

3 Criterios de seguridad.	Parámetro		
3.1 Nivel de riesgo de incendio en el proceso.	Ninguno	Bajo	Moderado
3.2 Toxicidad de agentes químicos usados en el proceso.	No aplica	Bajo	Alto
3.3 Uso de equipos elevados.	No aplica	-	Se usan equipos elevados

Tabla 19) Asignación de parámetro comparativo para Otros Criterios.

7 Otros criterios	Parámetro		
7.1 Tiempo de vida media.	Mayor a 15 años	De 10 a 15 años	Menor a 10 años
7.2 Generación de residuos.	No	-	Sí
7.3 Frecuencia de los mantenimientos.	Se realizan en periodos mayores a 6 meses	Se realizan cada 4 -6 meses	Se realizan en periodos menores a 4 meses

Como se puede observar en la tabla 18 y 19, los parámetros de comparación en algunos criterios contemplan una comparación de tres parámetros. El resto de los criterios de evaluación tienen un parámetro de comparación equivalente al mostrado en la tabla 18.

Una vez identificados los parámetros de comparación de cada criterio de evaluación, se procede a evaluar cada tecnología con el parámetro seleccionado. Los resultados se muestran en las tablas 20 – 26.

Tabla 20) Matriz comparativa de Criterios de emisión de COV a la atmosfera.

1 Criterios de emisión de COV a la atmosfera.	Adsorción - Absorción	Condensación criogénica	Absorción membranas Adsorción	Oxidación térmica regenerativa	Oxidación térmica recuperativa
1.1 Emisiones de COV con un valor máximo de 10 mg de COV, por litro de combustible cargado, al final del proceso.	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
1.2 Eficiencia de tratamiento de 80 % como mínimo.	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
1.3 Cumplimiento con la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente Capítulo II Artículo 113.	Cumple	Cumple	Cumple	No cumple	No cumple

Tabla 21) Matriz comparativa de Criterios de proceso.

2 Criterios de proceso.	Adsorción - Adsorción	Condensación criogénica	Absorción membranas Adsorción	Oxidación térmica regenerativa	Oxidación térmica recuperativa
2.1 La tecnología debe tener la capacidad de tratar flujos de COV de 1560 m ³ /h.	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
2.2 La tecnología debe operar a temperatura ambiente.	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	No cumple
2.3 La tecnología debe tener bajo consumo de refrigerantes.	Cumple	No cumple	Cumple	Cumple	Cumple
2.4 La tecnología debe tener bajo consumo eléctrico.	No cumple	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple
2.5 La tecnología debe tener bajo consumo de combustible.	Cumple	Cumple	Cumple	No cumple	Cumple

Tabla 22) Matriz comparativa de Criterios de seguridad.

3 Criterios de seguridad.	Adsorción - Adsorción	Condensación criogénica	Absorción membranas Adsorción	Oxidación térmica regenerativa	Oxidación térmica recuperativa
3.1 Nivel de riesgo de incendio en el proceso.	Bajo	Ninguno	Bajo	Moderado	Moderado
3.2 Toxicidad de agentes químicos usados en el proceso.	Bajo	Bajo	Bajo	No aplica	No aplica
3.3 Uso de equipos elevados.	Sí	No aplica	Sí	No aplica	No aplica

Tabla 23) Matriz comparativa de Criterios relacionados con el proveedor.

4 Criterios relacionados con el proveedor.	Adsorción - Adsorción	Condensación criogénica	Absorción membranas Adsorción	Oxidación térmica regenerativa	Oxidación térmica recuperativa
4.1 Existencia de múltiples proveedores.	Adsorción - Adsorción	Condensación criogénica	Absorción membranas Adsorción	Oxidación térmica regenerativa	Oxidación térmica recuperativa
4.2 Representantes nacionales de la tecnología.	Si	Si	Si	Si	Si
4.3 Facilidad del proveedor para realizar mantenimientos.	Si	Si	No	Si	Si
4.4 Facilidad del proveedor para ofrecer refracciones.	Si	Si	No	Si	Si
4.5 Facilidad del proveedor para ofrecer capacitación.	Si	Si	No	Si	Si
4.6 Garantías.	Si	Si	No	No	No

Tabla 24) Matriz comparativa de Criterios de tratamiento de COV.

5 Criterios de tratamiento de COV.	Adsorción - Adsorción	Condensación criogénica	Absorción membranas Adsorción	Oxidación térmica regenerativa	Oxidación térmica recuperativa
5.1 Capacidad para recuperar COV.	Sí	Sí	Sí	No	No
5.2 Capacidad para tratar COV con distintas composiciones.	Sí	No	si	Si	Si

Tabla 25) Matriz comparativa de Criterios relacionados con las necesidades específicas de la terminal.

6 Criterios relacionados con las necesidades específicas de la terminal.	Adsorción - Adsorción	Condensación criogénica	Absorción membranas Adsorción	Oxidación térmica regenerativa	Oxidación térmica recuperativa
6.1 El nuevo sistema de tratamiento de COV opera automáticamente	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
6.2 El nuevo sistema es capaz de operar 24 horas al día, los 365 días del año	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
6.3 El nuevo sistema es capaz de realizar su arranque y paro de forma automática	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
6.4 El sistema de tratamiento monitorea y cuantifica la concentración de sus emisiones	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

Tabla 26) Matriz comparativa de Otros criterios

7 Otros criterios	Adsorción - Adsorción	Condensación criogénica	Absorción membranas Adsorción	Oxidación térmica regenerativa	Oxidación térmica recuperativa
7.1 Tiempo de vida media.	Mayor a 15 años	Mayor a 15 años	Mayor a 15 años	Mayor a 15 años	Mayor a 15 años
7.2 Generación de residuos.	No	No	No	No	No
7.3 Frecuencia de los mantenimientos.	Se realizan cada 4 -6 Meses	Se realizan cada 4 -6 Meses	Se realizan cada 4 -6 Meses	Se realizan cada 4 -6 Meses	Se realizan cada 4 -6 Meses

3.4.2.2 Matriz criterio tecnología

El siguiente paso para la ponderación de los criterios de evaluación, es la construcción de un matriz criterio-tecnología. La construcción de esta matriz se encargara de calificar la alternativa tecnología “i” respecto a un criterio de evaluación “j”, de tal forma que cada tecnología sea calificada con cada criterio de evaluación.

La evaluación se realizara de forma simple, para el caso de los Criterios de emisión de COV a la atmosfera, aquellas tecnologías que cumplan con los criterios se les asignara una calificación de 10 para cada criterio cumplido, en cuanto aquellas tecnologías que no cumplan, se les asignara un valor de 1 en cada criterio no cumplido. Esta forma de evaluación será aplicable para los criterios con dos parámetros de evaluación. En cuanto a los “Criterios de Seguridad” y “Otros Criterios”, se tomara una escala con tres valores (1, 5 y 10), de tal forma que allá una relación entre el número de parámetros de evaluación y el número de calificaciones para cada parámetro. Las calificaciones de cada criterio y tecnología muestran en las tablas 27 – 32.

Tabla 27) Matriz criterio - tecnología de los Criterios de emisión de COV a la atmosfera.

1 Criterios de emisión de COV a la atmosfera.	Adsorción - Absorción	Condensación criogénica	Absorción membranas Adsorción	Oxidación térmica regenerativa	Oxidación térmica recuperativa
1.1 Emisiones de COV con un valor máximo de 10 mg de COV, por litro de combustible cargado, al final del proceso.	10	10	10	10	10
1.2 Eficiencia de tratamiento de 80 % como mínimo.	10	10	10	10	10
1.3 Cumplimiento con la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente Capítulo II Artículo 113.	10	10	10	1	1

Tabla 28) Matriz criterio - tecnología de los Criterios de proceso.

2 Criterios de proceso.	Adsorción - Absorción	Condensación criogénica	Absorción membranas Adsorción	Oxidación térmica regenerativa	Oxidación térmica recuperativa
2.1 La tecnología debe tener la capacidad de tratar flujos de COV de 1560 m ³ /h.	10	10	10	10	10
2.2 La tecnología debe operar a temperatura ambiente.	10	1	10	1	1
2.3 La tecnología debe tener bajo consumo de refrigerantes.	10	1	10	10	10
2.4 La tecnología debe tener bajo consumo eléctrico.	1	1	1	10	10
2.5 La tecnología debe tener bajo consumo de combustible.	10	10	10	1	10

Tabla 29) Matriz criterio - tecnología de los Criterios de seguridad.

3 Criterios de seguridad.	Adsorción - Adsorción	Condensación criogénica	Absorción membranas Adsorción	Oxidación térmica regenerativa	Oxidación térmica recuperativa
3.1 Nivel de riesgo de incendio en el proceso.	5	10	5	1	1
3.2 Toxicidad de agentes químicos usados en el proceso.	5	5	5	10	10
3.3 Uso de equipos elevados.	1	10	1	10	10

Tabla 30) Matriz criterio - tecnología de los Criterios relacionados con el proveedor.

4 Criterios relacionados con el proveedor.	Adsorción - Adsorción	Condensación criogénica	Absorción membranas Adsorción	Oxidación térmica regenerativa	Oxidación térmica recuperativa
4.1 Existencia de múltiples proveedores.	10	10	10	10	10
4.2 Representantes nacionales de la tecnología.	10	10	1	10	10
4.3 Facilidad del proveedor para realizar mantenimientos.	10	10	1	10	10
4.4 Facilidad del proveedor para ofrecer refracciones.	10	10	1	10	10
4.5 Facilidad del proveedor para ofrecer capacitación.	10	10	1	1	1
4.6 Garantías.	10	10	10	10	10

Tabla 31) Matriz criterio - tecnología de los Criterios de tratamiento de COV.

5 Criterios de tratamiento de COV.	Adsorción - Absorción	Condensación criogénica	Absorción membranas Adsorción	Oxidación térmica regenerativa	Oxidación térmica recuperativa
5.1 Capacidad para recuperar COV.	10	10	10	1	1
5.2 Capacidad para tratar COV con distintas composiciones.	10	1	10	10	10

Tabla 32) Matriz criterio - tecnología de los Criterios de tratamiento de COV.

6 Criterios relacionados con las necesidades específicas de la terminal.	Adsorción - Absorción	Condensación criogénica	Absorción membranas Adsorción	Oxidación térmica regenerativa	Oxidación térmica recuperativa
6.1 El nuevo sistema de tratamiento de COV opera automáticamente	10	10	10	10	10
6.2 El nuevo sistema es capaz de operar 24 horas al día, los 365 días del año	10	10	10	10	10
6.3 El nuevo sistema es capaz de realizar su arranque y paro de forma automática	10	10	10	10	10
6.4 El sistema de tratamiento monitorea y cuantifica la concentración de sus emisiones	10	10	10	10	10

Tabla 33) Matriz criterio - tecnología de Otros criterios

7 Otros criterios	Adsorción - Absorción	Condensación criogénica	Absorción membranas Adsorción	Oxidación térmica regenerativa	Oxidación térmica recuperativa
7.1 Tiempo de vida media.	10	10	10	10	10
7.2 Generación de residuos.	10	10	10	10	10
7.3 Frecuencia de los mantenimientos.	5	5	5	5	5

3.4.2.3 Ponderación de los criterios de evaluación

Para determinar la importancia relativa que existe entre cada uno de los criterios de evaluación, se considerará una ponderación objetiva, seguida de una ponderación subjetiva, las cuales darán pie a una ponderación definitiva.

3.4.2.3.1 Estimación de la ponderación objetiva.

Ponderación objetiva (Peso objetivo), se encarga de evitar que una tecnología gane por tener una alta calificación en un determinado criterio de evaluación.

Este mecanismo de ponderación se obtendrá aplicando el método de la entropía propuesto en el artículo “*Procedimiento para la evaluación de proveedores mediante técnicas multicriterio*”, mediante la siguiente metodología:

- A. Cálculo de la entropía de cada criterio: Para hallar la entropía (E_j) de cada criterio, se recurrió a la Ecuación 7.

$$E_j = \frac{-1}{\log M} \left(\sum_{i=1}^M R_{ij} \log R_{ij} \right) \quad \text{Ecuación. 7)}$$

- E_j : Entropía del criterio j [Adimensional].
- M : Número de alternativas tecnológicas a evaluar [7].
- R_{ij} : Calificación de la alternativa i , respecto al criterio j [Adimensional, ver tablas 28 – 33].

El subíndice “ i ” representa a cualquiera de las tecnologías evaluadas (Adsorción – Absorción, Compresión mecánica, etc.), mientras que el subíndice “ j ” representa a cualquiera de los criterios de evaluación.

- B. Cálculo de la dispersión de cada criterio: La dispersión para cada criterio se calcula a través de la Ecuación 8.

$$D_j = 1 - E_j \quad \text{Ecuación. 8)}$$

- D_j : Dispersión del criterio j [Adimensional].
- E_j : Entropía del criterio j [Adimensional].

- C. Cálculo del peso objetivo de cada criterio: Una vez obtenida la dispersión de cada criterio de evaluación, el peso objetivo de cada criterio se determina de acuerdo a la Ecuación 9.

$$W_{jO} = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^C D_j} \quad \text{Ecuación. 9)}$$

- W_{jO} : Peso objetivo del criterio j [Adimensional].
- D_j : Dispersión del criterio j [Adimensional].
- C : Número de criterios de evaluación [27].

Los valores de entropía (E_j), dispersión (D_j) y peso objetivo (W_{jO}) de cada criterio se muestran en la Tabla 34 Ponderación objetiva de cada criterio.

Tabla 34) Ponderación objetiva de cada criterio.

Criterio de evaluación j	Entropía (E_j)	Dispersión (D_j)	Peso objetivo (W_{jo})
1.1 Descarga máxima de 10 mg de COV por cada litro de combustible cargado, la final del proceso.	-59.2	60.2	0.050
1.2 Eficiencia de tratamiento de 80 % como mínimo.	-59.2	60.2	0.050
1.3 Cumplimiento con la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente Capítulo II Artículo 113.	-35.5	36.5	0.030
2.1 La tecnología debe tener la capacidad de tratar flujos de COV de 1560 m ³ /h.	-59.2	60.2	0.050
2.2 La tecnología debe operar a temperatura ambiente.	-23.7	24.7	0.020
2.3 La tecnología debe tener bajo consumo de refrigerantes.	-47.3	48.3	0.040
2.4 La tecnología debe tener bajo consumo eléctrico.	-23.7	24.7	0.020
2.5 La tecnología debe tener bajo consumo de combustible.	-47.3	48.3	0.040
3.1 Nivel de riesgo de incendio en el proceso.	-20.1	21.1	0.017
3.2 Toxicidad de agentes químicos usados en el proceso.	-36.1	37.1	0.031
3.3 Uso de equipos elevados.	-35.5	36.5	0.030
4.1 Existencia de múltiples proveedores.	-59.2	60.2	0.050
4.2 Representantes nacionales de la tecnología.	-47.3	48.3	0.040
4.3 Facilidad del proveedor para realizar mantenimientos.	-47.3	48.3	0.040
4.4 Facilidad del proveedor para ofrecer refracciones.	-47.3	48.3	0.040
4.5 Facilidad del proveedor para ofrecer capacitación.	-23.7	24.7	0.020
4.6 Garantías.	-59.2	60.2	0.050
5.1 Capacidad para recuperar COV.	-35.5	36.5	0.030
5.2 Capacidad para tratar COV con distintas composiciones.	-47.3	48.3	0.040
6.1 El nuevo sistema de tratamiento de COV opera automáticamente	-59.2	60.2	0.050
6.2 El nuevo sistema es capaz de operar 24 horas al día, los 365 días del año	-59.2	60.2	0.050
6.3 El nuevo sistema es capaz de realizar su arranque y paro de forma automática	-59.2	60.2	0.050
6.4 El sistema de tratamiento monitorea y cuantifica la concentración de sus emisiones	-59.2	60.2	0.050
7.1 Tiempo de vida media.	-59.2	60.2	0.050
7.2 Generación de residuos.	-59.2	60.2	0.050
7.3 Frecuencia de los mantenimientos.	-20.7	21.7	0.018
Total			1.000

3.4.2.3.2 Estimación de la ponderación subjetiva

La ponderación subjetiva se utiliza para, dar preferencia a un criterio con respecto a otro, de esta forma se asegura que el modelo de evaluación se ajuste a las necesidades de la TAR. No obstante, aunque se asigne un valor alto de ponderación a un determinado criterio de evaluación, este no obtendrá el mayor peso en la evaluación, debido a que también se toma en cuenta la ponderación objetiva.

El peso subjetivo de los criterios, se calcula a través de la aplicación del método del triángulo de Fuller modificado, el cual se lleva a cabo haciendo una comparación de los criterios por parejas. Para llevar a cabo esta comparación, se elabora una matriz criterio-criterio, donde se consignan las preferencias en cada pareja de criterios.

El llenado de la matriz criterio – criterio, consiste en la siguiente mecánica: Se selecciona un criterio, por ejemplo el criterio 1.1⁷ Emisiones de COV con un valor máximo de 10 mg de COV, por litro de combustible cargado, al final del proceso. El criterio 1.1 se compara con otro criterio de evaluación por ejemplo el 3.3 Uso de equipos elevados. De forma cualitativa se compara que criterio es más importante en la evaluación. Es intuitivo que el criterio 1.1 que regula las emisiones de COV, tiene una mayor importancia que el 3.3 que especifica que es preferible no contar con equipos elevados. Esta comparación del criterio 1.1, se debe realizar con cada uno de los 27 criterios de evaluación (incluyendo una comparación del criterio 1.1 con el mismo). Una vez que se especifica que criterio tiene prioridad sobre otro se realiza una matriz de forma simultánea, en la cual se marca con un número uno, cuando se tiene prioridad de un criterio (i) sobre otro criterio (j). En la tabla 35, se ilustra un ejemplo con tres criterios de evaluación.

⁷ Esta numeración fue asignada en el numeral 3.5.1.8 “Resumen de criterios de evaluación”.

Tabla 35) Ejemplo de comparación criterio – criterio.

Criterio j →	Criterio 1.1	Criterio 3.3	Criterio 5.1
Criterio i ↓			
Criterio 1.1	1	1	1
Criterio 3.3	0	1	0
Criterio 5.1	0	1	1

De acuerdo a la tabla 35, el criterio 1.1, tiene prioridad ante el criterio 3.3, correspondiente al uso de equipos elevados, y al criterio 5.1 que especifica la capacidad de recuperar COV, en ambos casos se ha colocado un número uno (1) en las celdas verticales del criterio 1.1 (criterio i), indicando que se tiene preferencia por este criterio ante los criterios 3.3 y 5.1 (criterios j). En el caso de que se prefiera un criterio j respecto a un criterio i, se debe colocar un cero (0), tal como se observa en la columna del criterio 3.3, donde al comparar con el criterio 1.1 se escribe un cero. En caso de comparar un criterio consigo mismo, (1.1 con 1.1, 3.3 con 3.3, etc.), se debe indicar un número 1.

Para realizar una comparación más simplificada, se tomara en cuenta la numeración indicada del numeral 3.5.1.8 “Resumen de criterios de evaluación”, para los criterios de evaluación.

Cabe resaltar que esta comparación criterio – criterio, es una comparación subjetiva, en la cual se recomienda que los administradores de la terminal, proporcionen el llenado de la matriz criterio – criterio, asegurando que se vean reflejas sus preferencias y necesidades. En la tabla 36 Matriz criterio - criterio, se muestra una tabla generada en base a los requerimientos del caso de estudio propuesto.

Tabla 36) Matriz criterio – criterio.

P _{ij}	Criterio 1.1	Criterio 1.2	Criterio 1.3	Criterio 2.1	Criterio 2.2	Criterio 2.3	Criterio 2.4	Criterio 2.5	Criterio 3.1	Criterio 3.2	Criterio 3.3	Criterio 4.1	Criterio 4.2	Criterio 4.3	Criterio 4.4	Criterio 4.5	Criterio 4.6	Criterio 5.1	Criterio 5.2	Criterio 6.1	Criterio 6.2	Criterio 6.3	Criterio 6.4	Criterio 7.1	Criterio 7.2	Criterio 7.3
Criterio 1.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Criterio 1.2	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Criterio 1.3	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Criterio 2.1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Criterio 2.2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Criterio 2.3	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Criterio 2.5	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Criterio 2.5	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Criterio 3.1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Criterio 3.2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Criterio 3.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Criterio 4.1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	
Criterio 4.2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	
Criterio 4.3	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Criterio 4.4	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Criterio 4.5	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Criterio 4.6	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Criterio 5.1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Criterio 5.2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
Criterio 6.1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
Criterio 6.2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
Criterio 6.3	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
Criterio 6.4	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1
Criterio 7.1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1
Criterio 7.2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Criterio 7.3	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1

Una vez definida la matriz criterio – criterio, se prosigue con la determinación del peso subjetivo. Para su cálculo se determina la preferencia total de cada criterio, es decir, la cantidad de veces que el criterio analizado es preferido respecto a los criterios restantes (Sumatoria de P_{ji}); de esta forma que el cálculo del peso subjetivo se obtiene mediante la Ecuación 10.

$$W_{kj} = \frac{\sum_i P_{ji}}{\sum_j \sum_i P_{ji}} \quad \text{Ecuación. 10)}$$

- W_{kj} : Peso subjetivo del criterio j [Adimensional].
- P_{ji} : Preferencia del criterio j sobre el criterio i [Adimensional].

Los valores de la preferencia del criterio j sobre el criterio i (P_{ji}) y el peso subjetivo de cada criterio, se muestran Tabla 37, Peso subjetivo de cada criterio.

Tabla 37) Peso subjetivo de cada criterio.

Criterios de evaluación	Sumatoria de la preferencia del criterio j sobre el criterio i ($\sum_i P_{ij}$)	Peso subjetivo del criterio j (W_{kj})
1.1 Descarga máxima de 10 mg de COV por cada litro de combustible cargado, la final del proceso.	26	0.074
1.2 Eficiencia de tratamiento de 80 % como mínimo.	24	0.068
1.3 Cumplimiento con la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente Capítulo II Artículo 113.	25	0.071
2.1 La tecnología debe tener la capacidad de tratar flujos de COV de 1160 m ³ /h	23	0.066
2.2 La tecnología debe operar a temperatura ambiente.	3	0.009
2.3 La tecnología debe tener bajo consumo de refrigerantes.	3	0.009
2.4 La tecnología debe tener bajo consumo eléctrico.	5	0.014
2.5 La tecnología debe tener bajo consumo de combustible.	3	0.009
3.1 Nivel de riesgo de incendio en el proceso.	22	0.063
3.2 Toxicidad de agentes químicos usados en el proceso.	20	0.057
3.3 Uso de equipos elevados.	2	0.006
4.1 Existencia de múltiples proveedores.	13	0.037
4.2 Representantes nacionales de la tecnología.	13	0.037
4.3 Facilidad del proveedor para realizar mantenimientos.	18	0.051
4.4 Facilidad del proveedor para ofrecer refracciones.	17	0.048
4.5 Facilidad del proveedor para ofrecer capacitación.	15	0.043
4.6 Garantías.	16	0.046
5.1 Capacidad para recuperar COV.	15	0.043
5.2 Capacidad para tratar COV con distintas composiciones.	13	0.037
6.1 El nuevo sistema de tratamiento de COV opera automáticamente	7	0.020
6.2 El nuevo sistema es capaz de operar 24 horas al día, los 365 días del año	8	0.023
6.3 El nuevo sistema es capaz de realizar su arranque y paro de forma automática	9	0.026
6.4 El sistema de tratamiento monitorea y cuantifica la concentración de sus emisiones	11	0.031
7.1 Tiempo de vida media.	11	0.031
7.2 Generación de residuos.	19	0.054
7.3 Frecuencia de los mantenimientos.	10	0.028
Sumatoria de la sumatoria de la preferencia del criterio j sobre el criterio i ($\sum_j \sum_i P_{ij}$)	351	1.000

3.4.2.3.3 Cálculo de la ponderación definitiva

Una vez determinados los valores objetivos y subjetivos de los criterios de evaluación, es posible determinar la ponderación definitiva de los criterios de evaluación a través de la Ecuación 11)

$$W_{jD} = \frac{W_{jO} * W_{kj}}{\sum_{j=1}^C W_{jO} * W_{kj}} \quad \text{Ecuación. 11)}$$

- W_{kj} : Peso subjetivo del criterio j [Adimensional].
- P_{ji} : Preferencia del criterio j sobre el criterio i [Adimensional].
- W_{jD} : Peso definitivo del criterio j [Adimensional].
- W_{kj} : Peso subjetivo del criterio j [Adimensional].
- W_{jO} : Peso objetivo del criterio j [Adimensional].
- C: Número de criterios de evaluación [27].

La ventaja que ofrece esta ponderación, es la inclusión de las preferencias del personal operativo de la terminal a través de la ponderación subjetiva. Los valores ponderados de cada criterio de evaluación se muestran en la Tabla 38 Ponderación de los criterios de evaluación.

Tabla 38) Ponderación de los criterios de evaluación.

Criterio	Peso objetivo (W_{jo})	Peso subjetivo (W_{kj})	(W_{jo})*(W_{kj})	Peso Definitivo (W_{jd})
1.1 Descarga máxima de 10 mg de COV por cada litro de combustible cargado, la final del proceso.	0.050	0.0741	0.0037	0.093
1.2 Eficiencia de tratamiento de 80 % como mínimo.	0.050	0.0684	0.0034	0.086
1.3 Cumplimiento con la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente Capítulo II Artículo 113.	0.030	0.0712	0.0021	0.054
2.1 La tecnología debe tener la capacidad de tratar flujos de COV de 1160 m3/h	0.050	0.0655	0.0032	0.082
2.2 La tecnología debe operar a temperatura ambiente.	0.020	0.0085	0.0002	0.004
2.3 La tecnología debe tener bajo consumo de refrigerantes.	0.040	0.0085	0.0003	0.009
2.4 La tecnología debe tener bajo consumo eléctrico.	0.020	0.0142	0.0003	0.007
2.5 La tecnología debe tener bajo consumo de combustible.	0.040	0.0085	0.0003	0.009
3.1 Nivel de riesgo de incendio en el proceso.	0.017	0.0627	0.0011	0.028
3.2 Toxicidad de agentes químicos usados en el proceso.	0.031	0.0570	0.0017	0.044
3.3 Uso de equipos elevados.	0.030	0.0057	0.0002	0.004
4.1 Existencia de múltiples proveedores.	0.050	0.0370	0.0018	0.047
4.2 Representantes nacionales de la tecnología.	0.040	0.0370	0.0015	0.037
4.3 Facilidad del proveedor para realizar mantenimientos.	0.040	0.0513	0.0020	0.052
4.4 Facilidad del proveedor para ofrecer refracciones.	0.040	0.0484	0.0019	0.049
4.5 Facilidad del proveedor para ofrecer capacitación.	0.020	0.0427	0.0009	0.022
4.6 Garantías.	0.050	0.0456	0.0023	0.057
5.1 Capacidad para recuperar COV.	0.030	0.0427	0.0013	0.033
5.2 Capacidad para tratar COV con distintas composiciones.	0.040	0.0370	0.0015	0.037
6.1 El nuevo sistema de tratamiento de COV opera automáticamente	0.050	0.0199	0.0010	0.025
6.2 El nuevo sistema es capaz de operar 24 horas al día, los 365 días del año	0.050	0.0228	0.0011	0.029
6.3 El nuevo sistema es capaz de realizar su arranque y paro de forma automática	0.050	0.0256	0.0013	0.032
6.4 El sistema de tratamiento monitorea y cuantifica la concentración de sus emisiones	0.050	0.0313	0.0016	0.039
7.1 Tiempo de vida media.	0.050	0.0313	0.0016	0.039
7.2 Generación de residuos.	0.050	0.0541	0.0027	0.068
7.3 Frecuencia de los mantenimientos.	0.018	0.0285	0.0005	0.013
Suma	1.00	1.00	0.04	1.00

3.4.3 Evaluación y selección de las alternativas tecnológicas identificadas.

Conforme a la Guía Gestión de tecnología para el desarrollo de proyectos de PEMEX 2013-2015 el paso subsecuente a la ponderación de los criterios de evaluación, es la Evaluación de las alternativas tecnológicas identificadas. Esta evaluación consiste en asignar una calificación en orden descendente a cada una de las tecnologías restantes a la Evaluación sencilla de cumplimiento o no cumplimiento del numeral 3.6.1, en la cual se asignó la calificación más alta a la tecnología que mejor se ajuste de forma técnica a las necesidades de la terminal.

La asignación de las calificaciones de estas tecnologías se realiza a partir de la matriz criterio-tecnología (Tablas 28 – 33), de la cual se procede a obtener la calificación ponderada de las tecnologías, aplicando el método de la suma ponderada, mediante la Ecuación 12.

$$A_i = \sum_{j=1}^M R_{ij} * W_{jD} \quad \text{Ecuación. 12)}$$

- Calificación A_i : Calificación de la tecnología i [Adimensional].
- R_{ij} : Calificación de la tecnología i , respecto al criterio j [Adimensional].
- W_{jD} : Peso definitivo del criterio j [Adimensional].
- M : Número de criterios de evaluación [M].

En la tabla 39 se muestran las Calificaciones (A_i) y sumas ponderadas de los criterios de evaluación, para cada tecnología.

Tabla 39) Sumas ponderadas.

Criterio/Tecnología	Adsorción - Absorción	Condensación criogénica	Absorción membranas Adsorción	Oxidación térmica regenerativa	Oxidación térmica recuperativa
Criterio 1.1	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
Criterio 1.2	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
Criterio 1.3	0.54	0.54	0.54	0.05	0.05
Criterio 2.1	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
Criterio 2.3	0.04	0.00	0.04	0.00	0.00
Criterio 2.4	0.09	0.01	0.09	0.09	0.09
Criterio 2.5	0.007	0.007	0.007	0.073	0.073
Criterio 2.6	0.09	0.09	0.09	0.01	0.09
Criterio 3.1	0.14	0.28	0.14	0.03	0.03
Criterio 3.2	0.22	0.22	0.22	0.44	0.44
Criterio 3.3	0.00	0.04	0.00	0.04	0.04
Criterio 4.1	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
Criterio 4.2	0.37	0.37	0.04	0.37	0.37
Criterio 4.3	0.52	0.52	0.05	0.52	0.52
Criterio 4.4	0.49	0.49	0.05	0.49	0.49
Criterio 4.5	0.22	0.22	0.02	0.02	0.02
Criterio 4.6	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57
Criterio 5.1	0.33	0.33	0.33	0.03	0.03
Criterio 5.2	0.37	0.04	0.37	0.37	0.37
Criterio 6.1	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Criterio 6.2	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
Criterio 6.3	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
Criterio 6.4	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
Criterio 7.1	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
Criterio 7.2	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
Criterio 7.3	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Calificación	9.47	9.20	8.03	8.59	8.67

Una vez evaluadas las tecnologías para el tratamiento de COV, se procede con la elaboración de la matriz de calificación de alternativas tecnológicas conforme a la Guía Gestión de tecnología para el desarrollo de proyectos de PEMEX 2013-2015. Los resultados se muestran en la tabla 40, Matriz de calificación de alternativas tecnológicas para el tratamiento de COV.

Tabla 40) Matriz de calificación de alternativas tecnológicas para el tratamiento de COV.

Tecnología	Calificación
Adsorción - Absorción	9.47
Condensación criogénica	9.20
Oxidación térmica recuperativa	8.67
Oxidación térmica regenerativa	8.59
Absorción membranas Adsorción	8.03

3.4.4 Definición de la tecnología más adecuada para el control de emisiones de la TAR.

Una vez definida la matriz de calificación de alternativas tecnológicas, se procede a la elaboración del informe del análisis de la evaluación de alternativas tecnológicas. A continuación se presenta el análisis de los resultados obtenidos a partir el modelo de evaluación.

De acuerdo a la Matriz de calificación de alternativas tecnológicas para el tratamiento de COV, la tecnología más adecuada para el tratamiento de COV, del caso de estudio propuesto es el proceso de Adsorción – Absorción con carbón activado, ya que esta tecnología obtuvo la calificación más alta ante las siete tecnologías avaladas.

Las ventajas ofrecidas por el proceso de Adsorción – Absorción, son las siguientes:

- Esta tecnología emite 5.9 mg de COV, a su eficiencia de 99%, por lo cual está dentro de los parámetros de diseño, permitidos.
- Eficiencia de tratamiento de 95 - 99% en el tratamiento de COV.
- Cumplimiento con la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente Capítulo II Artículo 113.
- La tecnología tiene la capacidad de tratar flujos de COV de 170 – 100000 m³/h (El requerimiento de la terminal es de 1560 m³/h)
- La tecnología opera a temperatura ambiente.
- La tecnología no usa refrigerantes.
- La tecnología no requiere del uso de combustible.
- La tecnología tiene un nivel bajo de riesgo de incendio.
- Los agentes químicos usados en el proceso, no representan un riesgo para la salud de los operarios.
- Este proceso cuenta con múltiples proveedores.
- Este proceso cuenta con representantes nacionales.
- Se cuenta con facilidad del proveedor para realizar mantenimientos.
- Se cuenta con facilidad del proveedor para ofrecer refracciones.
- Se cuenta con facilidad del proveedor para ofrecer capacitación.
- Las garantías ofrecidas por proveedores van en el orden de 2 años después de su instalación.
- La tecnología tiene la capacidad para recuperar COV.
- La tecnología puede tratar COV con distintas composiciones.
- El sistema de tratamiento de COV opera de forma automática y cuenta con un sistema de control del tipo supervisorio.
- El sistema es capaz de operar 24 horas al día, los 365 días del año, con el mantenimiento pertinente.
- La tecnología tiene la capacidad de realizar su arranque y paro de forma automática.

- El sistema de tratamiento puede ser adaptado para monitorear y cuantificar la concentración de las emisiones para verificar su correcto funcionamiento.
- El tiempo de vida media de la tecnología des de 20 años.
- El proceso de Adsorción – Absorción no genera residuos sólidos ni gaseosos.
- La frecuencia de los mantenimientos es de 4 meses.

Los criterios en los cuales esta tecnología no recibió una calificación perfecta fueron:

- Alto consumo eléctrico: Debido al consumo eléctrico de las bombas centrifugas.
- Uso de equipos elevados: La tecnología cuenta con una torre absolvedora cuya altura excede los 1.8 metros, lo cual implica la realización de trabajos de altura para su mantenimiento conforme al Procedimiento crítico para la prevención de caídas (400-GCSIPA-PO-14).
- Uso de agentes químicos en el proceso: La tecnología no cuenta con el uso de agentes químicos tóxicos, pero en la evaluación se contaba con tecnologías que no requerían del uso de algún agente químico, como en el caso de los quemadores y compresores, por tal motivo en este criterio tuvieron una mejor calificación otras tecnologías.
- Nivel de riesgo de incendio en el proceso: El nivel de riesgo de incendio en este proceso es bajo, pero aun así existe la generación de puntos calientes en los lechos de carbón activado.

5. CONCLUSIONES

- Gracias a la información proporcionada por el personal de la terminal de almacenamiento y reparto de Tula Hidalgo, se pudieron identificar las características y necesidades de la TAR, para la selección de una tecnología para el tratamiento de sus emisiones de compuestos orgánicos volátiles.

- Se pudo realizar la estimación de emisiones de COV, del caso de estudio propuesto, con el método presentado en el AP-42 “Compilation of air pollutant emission factors”, 5.2 Transportation And Marketing Of Petroleum Liquids¹⁻³, US Environmental Protection Agency (US EPA), el cual corresponde a un flujo total de 1560 m³/h.
- Se describieron las principales tecnologías disponibles en el mercado para el tratamiento de COV, que corresponden a los procesos de:
 - ✓ Absorción - Adsorción.
 - ✓ Condensación – Compresión.
 - ✓ Condensación – Criogénica.
 - ✓ Membranas.
 - ✓ Oxidación Térmica.
 - ✓ Oxidación Catalítica.
 - ✓ Biofiltración.
- Con la información recopilada se pudo realizar la matriz comparativa de las tecnologías disponibles en el mercado para el tratamiento de COV, mostrada en las tablas 10 – 16.
- De acuerdo a las características y requerimientos de la terminal, se pudieron establecer los criterios de evaluación para la selección de la tecnología para el tratamiento de COV. El resumen de criterios de evaluación se muestra en el numeral 3.5.1.8 Resumen de criterios de evaluación.
- Conforme a la Guía de gestión de tecnología para el desarrollo de proyectos de PEMEX 2013-2015. se llevó a cabo la evaluación tecnológica de las principales tecnologías disponibles en el mercado para el tratamiento de COV.
- Conforme a la evaluación tecnológica para los distintos sistemas de tratamiento de COV, se pudo seleccionar como la mejor alternativa tecnológica, al sistema de tratamiento de COV a base de absorción – adsorción.

- De acuerdo a la hipótesis planteada en el numeral 3 Hipótesis, se concluye que es posible implementar una tecnología adecuada para el tratamiento de COV, en una terminal de almacenamiento de hidrocarburos, que cuenta actualmente con una unidad de recuperación de COV, que dejó de dar servicio debido a la falta de refacciones disponibles en el mercado. La tecnología adecuada para el tratamiento de esta terminal es un sistema de absorción – adsorción con carbón activado. Los datos para el estudio fueron proporcionados por la Terminal de almacenamiento y reparto de la refinería de Tula, Hidalgo.

Referencias Bibliográficas

Ben Adamson. (2008). Vapour recovery during fuel loading. 24-08-2015. Sitio Web: <http://www.refeng.com.au/wp-content/uploads/132563.pdf>

U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Emission Factor and Inventory Group. (Septiembre 2006). 24-08-2015 Sitio Web: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch07/bgdocs/b07s01.pdf>

Marco Puglisi. (2011). Vapour Control Solutions for Product Transfer operation: An Overview. 24-08-2015. Sitio Web: http://www.tankstorageinternational.com/pdf/11/presentations/TSI2011_John_Zink.pdf

US EPA. (Abril 2015). AP 42, Fifth Edition, Volume I Chapter 5: Petroleum Industry 23-02-2016. Sitio Web: <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch05/index.html>

Anguil Environmental. (2016). Anguil Environmental. 14-03-2016. Sitio Web: <http://www.anguil.com/oxidizers/>

Rolando Ellis Chaves. (5 de julio del 2013). Condensador para control de COV's 23-02-2016. Sitio Web: <https://prezi.com/wzfm9ngvqybo/condensador-para-control-de-cov-s/>

EDWARDS ENGINEERING. (2010). The Right Process Cooling Chiller System. 14-03-2016. Sitio web: www.edwards-eng.com

Air Products. (2006). CRYO-CONDAP process. 14-03-15. Sitio web: www.airproducts.com/cryogenics

Jon Trembley, Oscar Beteta. (2014). Using Cryogenic Condensation. 3/06/2014, de Air Products Sitio web: www.process-cooling.com

Fachartikel. (2005). On the hunt for solvents with liquid nitrogen. 4/06/2014, de chemical plants & processes Sitio web: www.cpp-net.com

Vineet K. Gupta, Nishith Verma. (2002). Removal of volatile organic compounds by cryogenic condensation followed by adsorption. Chemical Engineering Science, 57, 2679 – 2696. 4/06/2014, De PERGAMON Base de datos.

Polaris. (2002). CRYOGENIC CONDENSATION TECHNOLOGY. 3/06/2014, de Polaris Sitio web: www.polarisengineering.com.

INTERNATIONAL PROCESS PLANTS. (2015). Página principal. 10-03-15. Sitio Web: <http://www.ippe.com/>

CARBOVAC ENVIRONMENTAL SERVICES. (4 Enero del 2016). CARBOVAC ENVIRONMENTAL SERVICES. Página oficial. 14-02-16. Sitio Web: <http://www.carbovac.com/>

GRUPO ROCAB, S.A. DE C.V. (2016) GRUPO ROCAB, S.A. DE C.V. 14-03-16. Sitio Web: <http://mx.kompass.com/c/grupo-rocab-s-a-de-c-v/mx749174/>

Barnett Shale. (2013). Understanding the Use of Vapor Recovery Units. 01-02-16 Sitio Web: http://www.bseec.org/understanding_the_use_of_vapor_recovery_units

HY-BON'S. (2015). Vapor Recovery Unit (VRU). 10-12-15. Sitio Web: <http://hy-bon.com/products/vru/>

PETROGAS SYSTEMS. (2016). VAPOR RECOVERY SYSTEM APPLICATIONS. 14-03-16. Sitio Web: <http://petrogassystems.com/technology/vapor-recovery>

MEMBRANE TECHNOLOGY AND RESEARCH, INC. (2016). MEMBRANE SOLUTIONS FOR INDUSTRIAL SEPARATIONS. 14-03-16. Sitio Web: <http://www.mtrinc.com/>

GMT MEMBRANTECHNIK GMBH (2016) HERZLICH WILLKOMMEN BEI GMT MEMBRANTECHNIK. 14-03-16. Sitio Web: <http://www.gmtmem.com/de/startseite.html>

PRODESA MEDIOAMBIENTE. (2016) Empresa. 14-03-2016. Sitio Web: <http://www.prodesa.net/index.php/es/>

GLENRO INC. (2009). Industrial Heating Process Solutions & Technology. 10-12-15. Sitio Web: <http://www.glenro.com/>

Zeeco. (2016). Zeeco Incinerators & Thermal Oxidizers.14-03-16. Sitio Web: <http://www.zeeco.com/incinerators/>

MEGTEC. (2016). Página principal .12-03-16. Sitio Web: <http://www.megtec.es/>

HI TEMP TECHNOLOGY CORPORATION. (2016). Thermal and Catalytic Oxidizers.12-03-16. Sitio Web: <http://www.megtec.es/>

ADWESTTECHNOLOGIES INC. (2010). FLAMELESS RETOX REGENERATIVE THERMAL OXIDIZER VOC ABATEMENT SYSTEMS. 12-03-16. Sitio Web: <http://www.adwestusa.com/>

JOHNSON MATTHEY. (2016). Catalysts & Catalytic Systems to Reduce Air Emissions from Stationary & Non-Road Sources. 12-03-16. Sitio Web: <http://www.jmsec.com/cm/Home.html>

UOP. (2016). Página principal. 12-03-16. Sitio Web: <http://www.uop.com/>

AIR & WATER SOLUTIONS, INC. (2016). BioOx® Clean Air System. 12-03-16. Sitio Web: <http://www.air-water-solutions.com/>

BOHN BIOFILTER CORPORATION. (2015). Odor and air Emissions Control. 10-03-15. Sitio Web: <http://bohnbiofilter.com/>

PURE AIR SOLUTIONS (2016) Odour and VOC control. 12-03-16. Sitio Web: <http://www.pureairsolutions.nl/en/site/odour-and-voc-control>

LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE Última Reforma DOF 09-01-2015

Guía de gestión de tecnología para el desarrollo de proyectos de PEMEX 2013-2015.

David M. Himmelblau. (1997). Principios básicos y cálculos en ingeniería química. Sexta edición. Enrique Jacob 20, Col El conde, 53500 Naucalpan de Juárez, Edo. De México. Sexta edición pág. 34.

Procedimiento crítico para la prevención de caídas (400-GCSIPA-PO-14), REV 3, 3 Noviembre de 2008.

Procedimiento para la evaluación de proveedores mediante técnicas multicriterio, Scientia et Technica Año X, No 24, Mayo 2004. UTP. ISSN 0122-1701”

Marcos Rosa-Brussin. Procesos para reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV's). Univ. Central de Venezuela, Fac. de Ciencias. 3 de octubre del 2014.

Delgado Saborit, Juana María. Validación e implementación de técnicas de captación pasiva para el estudio de los niveles y efectos de ozono troposférico y dióxido de nitrógeno en un área costera mediterránea. Universidad Jaume,

departamento de química inorgánica y orgánica. Castellón de la Pana, 20 de Diciembre de 2004.

Víctor Uriel Urueta Pérez. Tecnologías disponibles para el control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 2015.

AP-42 CHAPTER 7 TABLE 3-2. PROPERTIES (MV, WVC, WL, PV) OF SELECTED PETROLEUM LIQUIDS^a. Paj. 3 – 46