

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEO



**EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS Y FUGITIVAS  
EMITIDAS EN LAS PRINCIPALES UNIDADES DE PROCESOS  
PERTENECIENTES A LA REFINERÍA DE PUERTO LA CRUZ, ESTADO  
ANZOÁTEGUI.**

Realizado por:

**Vicmelys Andrea Cordero Velásquez**

**Nelglis Sinai Hernández Bellorín**

Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como Requisito Parcial  
para Optar al Título de

INGENIERO DE PETRÓLEO

Barcelona, Marzo de 2011

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO PETRÓLEO



**EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS Y FUGITIVAS  
EMITIDAS EN LAS PRINCIPALES UNIDADES DE PROCESOS  
PERTENECIENTES A LA REFINERÍA DE PUERTO LA CRUZ, ESTADO  
ANZOÁTEGUI.**

Asesor Académico

---

Ing. Química Oly Guerra. M.Sc

Barcelona, Marzo de 2011

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEO



**EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS Y FUGITIVAS  
EMITIDAS EN LAS PRINCIPALES UNIDADES DE PROCESOS  
PERTENECIENTES A LA REFINERÍA DE PUERTO LA CRUZ, ESTADO  
ANZOÁTEGUI.**

Jurado calificador

---

Prof. Oly Guerra. M.Sc

---

Prof. Rayda Patiño. M.Sc

---

Prof. Lorenzo Arditi. M.Sc

Barcelona, Marzo de 2011

## **RESOLUCIÓN**

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajo de grado de la Universidad de Oriente:

“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo quien lo participará al Consejo Universitario”.

## **DEDICATORIA**

A mi Dios todopoderoso

A mis padres

A mis hermanos

A mis sobrinos

A mis tíos y abuelos

A mis primos

A mis profesores

A mis maestros de la infancia

A mis amigos

**Vicmelys Cordero**

## **DEDICATORIA**

A mi DIOS todopoderoso

A mi madre

A mi padre

A mis abuelos

A mis hermanos

A mis tíos

A mis primos

A mi princesa Madeline

A mi príncipe Sebastian

A ti abuela Alicia

A ti tío Luis Alberto

**Nelgis Hernández**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar a Dios todopoderoso, por mostrarme siempre el camino a seguir, llenarme de sabiduría y fuerzas para seguir adelante en esta gran etapa de mi vida de aprendizaje, entrega y conocimiento, apartando cada obstáculo para alcanzar la meta.

A mi madre, Andrea Velásquez, por estar conmigo en todo momento brindándome su apoyo, amor y consejos valiosos que me ayudaron a crecer como persona, tener mayor seguridad en mí misma y demostrarme que el sacrificio vale la pena.

A mi padre, Vicente Cordero, por hacerme ver un poco más allá de las teorías imaginando y poniendo en práctica lo aprendido para desarrollar el ingenio, por su apoyo y lecciones de vida.

A mi hermanita, Vicmarys Cordero, mi segunda madre y amiga, por hacerme entender que debemos compartir nuestro tiempo no sólo en el estudio y la familia, sino también con los amigos y a mí misma, enseñándome que ellos complementan el día a día del estudiante.

A mi hermano, Victor Cordero, por enseñarme que los sueños se pueden lograr, de que no hay nada imposible si tienes fe y luchas por ello, por ser mi amigo y mi compañía.

A mi hermano, Vicente Cordero, por sus valiosos consejos, por estar siempre a mi lado aportando su granito de arena para explicarme algo que no entendía y que estaba a su alcance y recordarme lo importante que es saber de cultura general como herramienta para ser una persona integral.

A la Universidad de Oriente, por abrirme sus puertas y ser mi segunda casa donde compartí momentos de alegría y tristeza y obtuve conocimientos valiosos para ser una gran profesional.

A mis profesores del Departamento de Petróleo y Básico, por haberme proporcionado los conocimientos requeridos para seguir escalando pasos y poder llegar al nivel deseado como ingeniero, por mostrarme desde sus aulas la ardua tarea y responsabilidad que tiene un ingeniero de petróleo en el sitio de trabajo y ser nuestro incentivo y ejemplo a seguir.

A mi amiga Nelglis Hernández, compañera de tesis y amiga incondicional, quien siempre estuvo en todo momento brindándome su apoyo, compartiendo conocimientos y lecciones de vida.

A mi profesora y tutora, Oly Guerra, por recomendarnos este importante tema de tesis, por su gran ayuda y apoyo incondicional y todos aquellos conocimientos valiosos aportados.

A mi profesor Rafael Barrueta, por haberme proporcionado valiosos conocimientos y estar siempre al pendiente del desarrollo de este trabajo de investigación. Gracias por su ayuda incondicional.

A mi profesor y asesor, Simón Ruiz, por ayudarnos en el desarrollo de nuestro trabajo de investigación y por sus sugerencias.

A la profesora Rayda Patiño por habernos facilitado el simulador DISPER 4.0.



A la familia Hernández Bellowín, por haberme brindado las puertas de su casa y hacerme sentir parte de su familia. A ellos gracias por haber estado en todo momento pendiente de la ejecución de este trabajo de investigación.

A mis amigos, Franklin, Mariam, Ramón, Andreina, Carolina, Leandra, Edward, María, Angel, Maira, Katerin, Rafael, Simón, Argilio, Manuel, quienes hicieron que el camino se hiciera un poco más corto y llevadero con su gran carisma y ánimo en momentos libres y de estudio.

**Vicmelys Cordero**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi Dios todopoderoso por ser mi guía en esta y cada una de las metas importantes en mi vida, por darme la fuerza para levantarme cuando he caído y por sobre todas las cosas, darme la sabiduría para seguir por el camino del bien.

A mi madre adorada Deiglis Bellorin, la persona más importante en mi vida. Gracias madre por ser la mejor mamá del mundo, por estar en todo momento conmigo y apoyarme siempre, por ser mi mejor amiga, mi compañera y mi todo. Este triunfo es completamente tuyo. Te amo.

A mi padre Nelson Hernández, te doy las gracias papá por el apoyo y amor siempre demostrado, por saber entenderme en todo momento, por tener siempre las palabras correctas en el momento perfecto cuando más las necesito. Me siento orgullosa de tener un padre como tú. Te quiero mucho.

A mi hermanos, es una dicha para mi tener personas en mi vida tan maravillosas, exitosas e únicos como los son ustedes, les doy las gracias por el apoyo y por estar siempre unidos. Especialmente a Nelson A y a ti Gerson H, por estar conmigo en los momentos felices y tristes y por estar presente cuando más los necesito. Los adoro mucho.

A mis tíos por apoyarme durante toda mi carrera. En especial a ti tía Yubisay por ser una segunda madre para mí y a ti tía Nairobi, por ser una amiga con la que siempre puedo contar y confiar, gracias por tus buenos consejos siempre.

A mi compañera de tesis y gran amiga Vicmelys C, gracias amiga por ser una excelente persona en la que puedo confiar y contar siempre, por ser la mejor compañera de tesis. Te quiero mucho.

A mis amigos por ser los mejores del mundo, por demostrarme su cariño, su apoyo y por ser parte esencial de mi vida. Gracias a ti Karla C, Karline C y a ti José Luis, más que amigos han sido unos hermanos para mí que en todo momento me acompañan. Los quiero mucho.

A la profesora Oly Guerra por tener la iniciativa de ofrecernos el tema, gracias por ser un pilar fundamental para la culminación de este trabajo de grado. Dios la bendiga siempre.

A la profesora Rayda Patiño, por facilitarnos el simulador Disper 4.0.

Al profesor Rafael Barrueta por la ayuda y el apoyo demostrado en todo momento.

**Nelglis Hernández**

## RESUMEN

El presente estudio se realizó con la finalidad de evaluar las emisiones atmosféricas y fugitivas emitidas en las principales unidades de procesos pertenecientes a la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui, en las zonas aledañas a ésta, teniendo como objetivo primordial seleccionar las mejores técnicas que permitan la reducción de la concentración de los gases contaminantes provenientes de la Refinería, en vista de estos generan un impacto en el ambiente y en la salud de las personas expuestas a estos gases. Para efectuar la evaluación de dichos gases, se utilizó como herramienta de análisis la norma EPA (2003) y posteriormente con la ayuda del software DISPER 4.0 se modeló el comportamiento de los contaminantes atmosféricos producto de la combustión provenientes de las principales unidades de proceso de la Refinería, para así determinar el área de impacto o alcance de estos en el ambiente. Para ello, se realizó un diagnóstico de la caracterización de emisiones atmosféricas aportada por la Refinería de Puerto La Cruz y se identificaron las principales fuentes de emisión de cada unidad de procesos, con su respectivas concentraciones de gases contaminantes. Seguidamente se establecieron las emisiones fugitivas por concepto de componentes (accesorios y equipos). La medición de las concentraciones de estos contaminantes atmosféricos, fueron comparados con la normativa ambiental correspondiente (Decreto 638), para así estimar la calidad del aire en las zonas más afectadas. Entre los resultados más resaltantes se puede destacar que dentro de las unidades de procesos estudiadas, la que presentó mayor emisión de contaminantes atmosféricos fue la unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado, cuyos compuestos excedieron el límite máximo permisible, siendo el más crítico el CO con un valor de 31802881,1110  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En lo que respecta a emisiones fugitivas, las válvulas representaron el componente que arrojó mayor emisión por este concepto, especialmente para el flare de la unidad de Craqueo Catalítico con un porcentaje de 90,90%. En este sentido, se seleccionaron técnicas que permitan disminuir la concentración de contaminantes durante los procesos de refinación, siendo la técnica de absorción la más eficiente y económicamente rentable.

## ÍNDICE GENERAL

RESOLUCIÓN .....	iv
DEDICATORIA .....	v
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTOS .....	vii
AGRADECIMIENTOS .....	x
RESUMEN.....	xii
ÍNDICE GENERAL .....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xvii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....	19
1.1. Planteamiento del problema.....	19
1.2. Objetivos de la Investigación.....	21
1.2.1. Objetivo General.....	21
1.2.2. Objetivos Específicos.....	21
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....	22
2.1. Antecedentes de la investigación .....	22
2.2. Ubicación Geográfica del Área:.....	24
2.3. Resumen de conocimientos previos.....	25
2.3.1. Impacto ambiental causado por las Refinerías.....	25
2.3.2. Principales Procesos realizados en una Refinería .....	25
2.3.3. Contaminantes atmosféricos primarios y secundarios .....	34
2.3.3.1 Principales tipos de contaminantes del aire .....	35
2.3.3.2 Tipos de emisiones atmosféricas provenientes de las unidades de procesos de una Refinería .....	36
2.3.4. Principales Gases Contaminantes provenientes de los procesos de refinación .....	41

2.3.5 Efectos causados por los principales contaminantes provenientes de los procesos industriales sobre la salud humana.....	44
2.3.6. Análisis De Dispersión.....	47
2.3.6.1. Modelo Gaussiano: .....	49
2.3.6.2 Modelos numéricos. ....	54
2.3.6.3 Modelos estadísticos o empíricos. ....	55
2.3.6.4. Modelos físicos. ....	56
2.3.7. Software DISPER 4.0 .....	56
CAPITULO III. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	58
3.1. Identificación de las principales fuentes de emisiones atmosféricas provenientes de las unidades de procesos de la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui. ....	58
3.2. Cuantificación de las concentraciones de los gases contaminantes (CO, H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub> ) provenientes de las principales unidades de procesos.....	59
3.2.1. Cálculo de las Concentraciones Promedios de los Gases (CO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S) entre ambas corridas.....	59
3.3. Investigación de las emisiones fugitivas (COV, CH <sub>4</sub> y C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ) provenientes de los accesorios y equipos principales de las unidades de procesos, según lo establecido en la norma EPA (2003).....	59
3.4. Modelado del comportamiento de los gases contaminantes emanados durante la combustión, a través del software DISPER 4.0 .....	61
3.4.1. Comparación entre los valores arrojados por el Software y las concentraciones máximas permisibles establecidas por la normativa ambiental. ....	62
3.5. Análisis del impacto sobre la salud de la población perteneciente a las zonas aledañas a la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui.....	63
3.6. Evaluación de las mejores técnicas de mitigación de las emisiones atmosféricas en la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui. ....	65
3.6.1. Técnicas de eliminación de contaminantes atmosféricos.....	65

3.6.2. Técnicas de control .....	66
3.6.3. Ventajas y desventajas de las técnicas de control estudiadas .....	69
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71
4.1. Identificación de las principales fuentes de emisiones atmosféricas provenientes de las unidades de procesos de la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui. ....	71
4.2. Cuantificación de las Concentraciones de los Gases Contaminantes (CO, H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub> ). ....	73
4.2.1. Resultados de las Concentraciones promedios de los Contaminantes Atmosféricos (CO, H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub> ). ....	73
4.3. Investigación de las emisiones fugitivas (COV, CH <sub>4</sub> y C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ) provenientes de los accesorios y equipos principales de las unidades de procesos, según lo establecido en la norma EPA (2003).....	78
4.3.1. Resultados de las emisiones fugitivas (COV, CH <sub>4</sub> y C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ) en las principales fuentes fijas.....	78
4.3.1.1. Unidad de Destilación Atmosférica 1 (DA-1). Fluido liviano.....	79
4.3.1.2. Unidad de Destilación Atmosférica 2 (DA-2). Fluido pesado.....	81
4.3.1.3. Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC). Fluido liviano .....	83
4.3.1.4. Alquilación. Fluido liviano .....	86
4.3.1.5. Unidad de Hidroprocesos. Fluido liviano .....	89
4.3.1.6. Unidad de GLP. Fluido liviano .....	92
4.3.1.7. Servicios Industriales (RPLC). Fluido liviano.....	94
4.5. Análisis del impacto sobre la salud de la población perteneciente a las zonas aledañas a la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui.....	106
4.5.1. Resultados de las encuestas realizadas:.....	106
4.5.2. Record actual de enfermedades respiratorias en los sectores de Guanire, Gulf, Chuparin y Guaraguao.....	111

4.6. Evaluación de las mejores técnicas de mitigación de las emisiones atmosféricas en la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui.....	112
4.6.1. Mejor técnica de mitigación de emisiones atmosféricas.....	112
CONCLUSIONES .....	114
RECOMENDACIONES.....	116
BIBLIOGRAFÍA .....	118
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO .....	120



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b> Clases de estabilidad de Pasquill <sup>[13]</sup> .....	52
<b>Tabla 3.1.</b> Valores fijados por defecto en el Software DISPER 4.0. ....	62
<b>Tabla 4.1.</b> Fuentes Fijas de las diferentes Unidades de Procesos. <sup>[18]</sup> .....	71
<b>Tabla 4.2.</b> Concentraciones de Gases Contaminantes.....	73
<b>Tabla 4.3.</b> Concentraciones de emisiones fugitivas de la unidad Destilación Atmosférica 1.....	79
<b>Tabla 4.4.</b> Porcentaje total de emisiones fugitivas entre ambas fuentes fijas .....	79
<b>Tabla 4.5.</b> Concentraciones de emisiones fugitivas de la unidad Destilación Atmosférica 2.....	81
<b>Tabla 4.6.</b> Porcentaje total de emisiones fugitivas entre ambas fuentes fijas .....	81
<b>Tabla 4.7.</b> Concentraciones de emisiones fugitivas de la unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado.....	83
<b>Tabla 4.8.</b> Porcentaje total de emisiones fugitivas entre ambas fuentes fijas .....	83
<b>Tabla 4.9.</b> Concentraciones de emisiones fugitivas de la unidad de Alquilación.....	86
<b>Tabla 4.10.</b> Porcentaje total de emisiones fugitivas entre ambas fuentes fijas .....	86
<b>Tabla 4.11.</b> Concentraciones de emisiones fugitivas de la unidad de Hidroprocesos.....	89
<b>Tabla 4.13.</b> Concentraciones de emisiones fugitivas de la unidad de GLP.....	92
<b>Tabla 4.14.</b> Porcentaje total de emisiones fugitivas del flare.....	93
<b>Tabla 4.15.</b> Concentraciones de emisiones fugitivas de la unidad de Servicios Industriales. (Continuación).....	95
<b>Tabla 4.16.</b> Porcentaje total de emisiones fugitivas entre calderas y turbogeneradores .....	95
<b>Tabla 4.17.</b> Resultados arrojados por el Software DISPER 4.0.....	99
<b>Tabla 4.17.</b> Resultados arrojados por el Software DISPER 4.0. (Continuación).....	100

**Tabla 4.18.** Eficiencia y eficacia en técnicas de mitigación de emisiones contaminantes..... 112

# **CAPÍTULO I.**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Planteamiento del problema**

La importancia del recurso aire para los seres vivos en general y para los seres humanos en particular está fuera de toda discusión; sin embargo a lo largo de su historia sobre el planeta tierra el hombre ha ejercido acciones negativas de creciente intensidad que afectan la atmósfera, siendo la principal acción la actividad industrial que no ha dejado de crecer hasta hoy, por cuanto está asociada al desarrollo económico de los países. Este sustancial y acelerado incremento en la actividad industrial produjo en forma paralela un aumento de todas las partículas y emisiones gaseosas originadas por dicha fuente.

Hoy en día, Venezuela continúa siendo un país mono productor, donde la explotación y refinación del crudo se ha convertido en una de las actividades de mayor importancia en nuestro país, ya que del petróleo se obtienen los principales productos de consumo y uso cotidiano de la población y sirve como materia prima para la exportación. Sin embargo, muchos de estos procesos vienen acompañados de la quema de combustibles, afectando de manera directa a la atmósfera y por otra parte la salud del personal que labora en las refinerías y de los habitantes pertenecientes a las zonas adyacentes, donde se lleven a cabo dichos procesos.

Es de suma importancia conocer la variedad y cantidad de gases contaminantes que estos procesos generan. Estos a su vez, se traducen en efectos negativos potenciales para la salud humana y promueven la contaminación de ambientes exteriores; los más comunes son: CO, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, COV, entre otros, provenientes de actividades realizadas por el hombre como: la quema de basura, el humo de los vehículos, uso de productos químicos y también los gases generados por

la industria química y petroquímica. Estos suelen estar presentes en trazas, es decir, en concentraciones que rondan las pocas ppm (partes por millón), sin embargo, el problema surge cuando su concentración sobrepasa la concentración ambiental permisible (CAP) según la norma pertinente. Aunque éste es un problema bien diagnosticado, su solución dista de ser única y definitiva.

Sin duda, uno de los factores con mayor incidencia en el incremento de la contaminación del aire lo constituye el uso de la energía obtenida a partir de combustibles y las actividades industriales. En este sentido, se evaluará en dicho proyecto de investigación las emisiones atmosféricas y fugitivas emitidas en las principales unidades de procesos, pertenecientes a la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui, mediante la investigación de emisiones fugitivas (COV, CH<sub>4</sub> y C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) provenientes de los equipos y accesorios principales de las unidades de procesos, según lo establecido en la Norma EPA (2003). Así mismo, se simulará el comportamiento de los gases contaminantes (CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S) emanados durante la combustión producto de estas unidades de Procesos, a través del Software DISPER 4.0, lo cual permitirá determinar el área de impacto y comparando los resultados de la simulación con los límites de emisión establecidos por la normativa ambiental correspondiente, se establecerá de qué manera estas emisiones de gases afectan las zonas aledañas a la Refinería en estudio. Posteriormente, mediante la realización de encuestas se analizarán los impactos sobre la salud de la población perteneciente a las zonas afectadas por las emisiones atmosféricas y fugitivas evaluadas. Esto con el fin de evaluar las mejores técnicas que permitan una disminución de gases contaminantes presentes en la atmósfera, logrando así un menor impacto ambiental, así como también una mejor calidad de vida de las personas directamente perjudicadas.

## **1.2. Objetivos de la Investigación**

### **1.2.1. Objetivo General**

Evaluar las Emisiones Atmosféricas y Fugitivas emitidas en las Principales Unidades de Procesos, pertenecientes a la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

1. Identificar las Principales Fuentes de Emisiones Atmosféricas provenientes de las Unidades de Procesos de la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui.
2. Cuantificar las Concentraciones de los Gases Contaminantes (CO, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>), provenientes de las Principales Unidades de Procesos.
3. Investigar las Emisiones Fugitivas (COV, CH<sub>4</sub> y C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) provenientes de los Accesorios y Equipos Principales de las Unidades de Procesos, según lo establecido en la Norma EPA (2003).
4. Modelar el Comportamiento de los Gases Contaminantes emanados durante la Combustión, a través del Software DISPER 4.0.
5. Analizar los Impactos sobre la Salud de la Población perteneciente a las Zonas aledañas a la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui.
6. Evaluar las Mejores Técnicas de Mitigación de las Emisiones Atmosféricas en la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui.

## **CAPÍTULO II.**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de la investigación**

➤ Cuesta y Colaboradores, mostraron los valores obtenidos de la calidad del aire experimental en una zona de la ciudad de Habana con fuerte influencia industrial y del tráfico automotor. El  $\text{SO}_2$  y las partículas suspendidas totales resultaron ser un tercio superiores en ambientes exteriores, mientras que el  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  y  $\text{H}_2\text{S}$  registraron valores mayores en los ambientes interiores. Las concentraciones de  $\text{SO}_2$  y las partículas suspendidas totales superan en esta zona las concentraciones máximas admisibles según las normas Cubanas. En estas zonas la prevalencia de enfermos por infecciones respiratorias (asma bronquial) fue superior a la media de la ciudad. Las variables meteorológicas, humedad relativa y temperatura presentaron valores ligeramente superiores en ambientes interiores, mientras la fuerza del viento fue aproximadamente dos veces superior en ambiente exterior.<sup>[1]</sup>

➤ Camargo, determinó la calidad del aire en la ciudad de Panamá, mediante la medición de la concentración de algunos contaminantes gaseosos en el área del cruce de Calle 50 y Vía Brasil, producto de la combustión interna de los vehículos automotores. Determinó las concentraciones de monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno mediante el detector Passport. Concluyó que los niveles de monóxido de carbono se encontraron en el límite del nivel establecido como máximo permisible por la Organización Mundial de la Salud, tanto en la estación seca como la lluviosa, en cambio no pudo detectar  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_2$  en forma continua como lo hizo con el CO, por ser el mínimo de detección de este aparato 1 ppm, sin embargo, si hubo ocasiones en que si los detecto, lo cual indicó que sus niveles estaban por debajo de 1 ppm. A pesar de ello no resultó favorable, ya que los niveles establecidos como máximos permisibles son igualmente menores de 1 ppm.<sup>[2]</sup>

➤ Rojas G, evaluó la calidad del aire interior en la biblioteca “Dr. Luís García Pellísier” de la Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui. Para realizar la evaluación, utilizó dos equipos sofisticados de medición, el Detector Multigas Sirius de la MSA Instrument Division y el Datalogger DO2003 Marca Delta OHM, el primero capaz de medir compuestos orgánicos volátiles (COVs) presentes en el interior de la edificación, y el segundo mediante una sonda de hilo caliente utilizado para medir los parámetros de confort térmico del recinto en estudio. Concluyó que la concentración de COVs evaluado no sobrepasó el límite permisible establecido, no obstante, está al alcance de los usuarios la percepción del efecto nocivo que estos causan en ellos, sin embargo, propuso algunas estrategias que permitan disminuir la concentración de contaminantes en el ambiente estudiado.<sup>[3]</sup>

➤ Ruíz y Yegres, midieron las concentraciones de (COV's) en las prácticas de laboratorio de procesamiento de hidrocarburos del departamento de petróleo de la Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui. Desarrollaron un procedimiento sistemático para la aplicación del equipo Biosystem PhD<sub>5</sub>, que permitió identificar los distintos gases emanados durante las prácticas de Laboratorio de Procesamiento de Hidrocarburos y medir las concentraciones de los mismos, tomando como punto de referencia las concentraciones establecidas por las normativas de ambiente. Según los datos obtenidos observaron que en la mayoría de las prácticas se sobrepasaron los Límites de Exposición a corto plazo, con excepción de la práctica de enturbiamiento y fluidez, pero ello se debió a que la prueba duró sólo seis minutos, puesto que el crudo por ser pesado alcanzó el punto de solidificación bastante rápido; por su parte las otras pruebas cuya duración fue mayor las emisiones de gases tóxicos fueron más notorias. Con respecto a los límites de Exposición Máxima, en su mayoría todos estuvieron por debajo de los límites permisibles, con excepción de la prueba de asfaltenos, cuyo excedente fue de 452 ppm con respecto a lo permitido.<sup>[4]</sup>

## 2.2. Ubicación Geográfica del Área:

La Refinería Puerto La Cruz es uno de los Centros de Procesamientos de crudo más importantes de PDVSA e integra un circuito de manufactura del petróleo extraído en los Campos de los estados Monagas y Anzoátegui.

Geográficamente, esta planta abarca tres áreas operacionales: Puerto La Cruz, El Chaure y San Roque, ubicados en el Norte y Centro del estado Anzoátegui, con una capacidad total de procesamiento de crudo de 200 mil barriles por día, de los cuales se obtienen 73 mil barriles de gasolina y nafta, 12 mil de kerosene-jet, 43 mil barriles de gasoil y 73 mil barriles de residual, insumos y requeridos para la mezcla de combustibles comercializados en el mercado interno y de exportación. En la Figura 1 se observa la ubicación geográfica de la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui. [5]



**Figura 2.1.** Ubicación Geográfica de la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui. [5]



## **2.3. Resumen de conocimientos previos**

### **2.3.1. Impacto ambiental causado por las Refinerías**

Los impactos ambientales de la refinación de petróleo son el resultado, principalmente, de las emisiones gaseosas, descargas de efluentes, desechos sólidos, ruido, olor y efectos visuales o estéticos. Las emisiones atmosféricas constituyen las causas más significativas de los impactos ambientales negativos de las refinerías. Las más importantes son las partículas, hidrocarburos volátiles, monóxido de carbono, óxidos de azufre y de nitrógeno (NOx). Emanan de diferentes fuentes incluyendo la unidad de desintegración catalítica, los procesos de recuperación de azufre, calentadores, desfuegos, mecheros y almacenamiento de los productos o materias primas. Los sellos de las bombas y las válvulas pueden originar las emisiones fugitivas. La combinación de estas emanaciones puede causar olores nocivos que afectarán a grandes áreas alrededor de la refinería. Se emplean grandes cantidades de agua en la refinación de petróleo para lavar los materiales indeseados de la corriente del proceso, para enfriamiento y producción de vapor, y en los procesos de reacción. Entre los contaminantes principales que se encuentran en los efluentes de las refinerías de petróleo tenemos: aceite y grasa, amoníaco, compuestos fenólicos, sulfuros, ácidos orgánicos, y cromo y otros metales. Se pueden expresar estos contaminantes en términos de su demanda de oxígeno bioquímico (DOB<sub>5</sub>), o químico (DQO) y el contenido de carbón orgánico total (COT).<sup>[6]</sup>

### **2.3.2. Principales Procesos realizados en una Refinería**

#### **➤ Destilación Atmosférica:**

La Destilación Atmosférica es un proceso que consiste en la separación de las fracciones de hidrocarburos contenidos en el petróleo. Se trata de una de las primeras etapas del proceso de refino y las primeras Refinerías de petróleo se resumían poco

más o menos a una columna de destilación. La destilación está basada en la diferencia entre las temperaturas de ebullición de cada uno de los componentes del petróleo. En efecto, cada hidrocarburo puro posee características físicas y químicas específicas. Por ejemplo, los puntos de ebullición de algunos hidrocarburos más sencillos son:

- Metano:  $-161,4\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Etano:  $-88,6\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Propano:  $-42,2\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Butano:  $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Pentano:  $36,3\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Hexano:  $69\text{ }^{\circ}\text{C}$

Dentro del proceso de refinado de un crudo se utilizan en un primer momento las características físicas de cada uno de los compuestos de la mezcla, como la temperatura de ebullición, para separar dichos compuestos y extraer las fracciones primarias. Esta operación se denomina destilación. De manera análoga a una destilería de bebidas alcohólicas, el petróleo es calentado e introducido en una columna cerrada que se denomina *columna de destilación atmosférica*. Gracias a las diferentes temperaturas de ebullición de los compuestos, se produce la vaporización de las fracciones más o menos ligeras, pudiendo recoger a diferentes niveles de la columna las fracciones de productos ligeros, intermedios, medios y pesados.

La destilación se denomina “atmosférica” debido a que se lleva a cabo a una presión ligeramente superior a la presión atmosférica en una columna que dispone de un cierto número de platos (en general de 30 a 50). Después de esta primera destilación, la parte residual del fondo de la columna es enviada a otra columna, de menor tamaño y con un número de platos menor que se denomina *columna de destilación a vacío*. Esta fracción residual, llamada *residuo atmosférico*, contiene

hidrocarburos con largas cadenas, hidrocarburos susceptibles de quemarse formando “coque” si son calentados a más temperatura a presión atmosférica.

Para evitar la rotura de estas cadenas, la separación de los productos de este residuo atmosférico a vacío, a una presión de alrededor de 40 mmHg (la presión atmosférica corresponde a 760 mmHg). La presión reducida permite rebajar el punto ebullición de los compuestos y por tanto se necesita calentar menos.

Debido a la complejidad de la mezcla de que está compuesto cualquier crudo, el objetivo de la destilación no es obtener los cuerpos puros por separado, sino la obtención de fracciones.

En un primer momento, el crudo pasa a través de un *tren de intercambiadores* para ser calentado a una temperatura de unos 110°C, adecuada para la etapa de desalado, donde mediante la adición de agua dulce y gracias a un campo electrostático, el crudo es descargado de su contenido en sales.

El crudo para a continuación a segundo tren de intercambio y posteriormente a un horno donde su temperatura aumenta hasta unos 360°C. Después es introducido en la columna de destilación atmosférica. Como el crudo entra en la columna a una presión elevada, que se haya a una presión menor, sufre una descompresión brutal llamada *flash*. Esta descompresión hace que la fracción ligera del crudo se evapore y se encamine hacia la parte alta de la columna, llamada *sección de enriquecimiento*. Una segunda fracción, más pesada, permanece en forma líquida y cae hacia la parte inferior de la columna, llamada *sección de agotamiento*.

Para llevar a cabo el intercambio de materia, base del fraccionamiento por destilación, los vapores ascendentes deben entrar en contacto con el líquido que descende, circulando a contracorriente en la columna. Por ello, una parte del líquido

obtenido por condensación en lo alto de la columna es reintroducido en la columna en forma de líquido hacia los platos inmediatamente inferiores.

Este lavado del vapor ascendente hace que, por transferencia de calor y de materia, el líquido descendente se enriquezca en componentes pesados. La fase vapor que asciende hacia los platos superiores se enriquece al contrario de los constituyentes más ligero, aumentando de manera progresiva a medida que asciende en la columna.

De esta manera se establece en la columna, de arriba abajo, un gradiente creciente de temperatura (entre 110°C en el fondo). El intercambio de materia entre el líquido y el vapor constituye el reflujo. Cuando más elevado es la *tasa de reflujo* mejor es la separación entre los diferentes productos, esta tasa de reflujo se sitúa en torno a 7 en la columna de destilación atmosférica.

La fracción más ligera se obtiene en lo alto de la columna, esta fracción contiene gases licuados y nafta. Descendiendo en la columna por medio de corrientes laterales se obtienen queroseno, gasóleo ligero, gasóleos medios, gasóleo pesado y en el fondo de la columna el residuo atmosférico. Las fracciones obtenidas en las corrientes laterales son sometidas además a un fraccionamiento complementario llamado *stripping* en columnas despojadoras anexas llamadas *strippers*, donde se eliminan las fracciones ligeras disueltas. Este stripping se lleva a cabo por medio de una inyección de vapor de agua a contracorriente. El residuo atmosférico puede ser utilizado directamente en la fabricación de “fuel oil” (aceites combustibles) pesados comerciales o bien puede ser sometido a un nuevo fraccionamiento: la destilación de vacío. Todas las fracciones obtenidas en la destilación atmosférica son el resultado de una separación primaria y todas ellas van a ser utilizadas como alimentación de otras unidades de la refinería. (Apéndice A).

La columna de destilación, de forma cilíndrica, está constituida de platos perforados que disponen de campanas y chimeneas, situados unos encima de otros. En general, el número de platos oscila en torno a 40, variando entre 30 y 50 en función del tipo de crudo que se quiera tratar. La columna posee una entrada que se sitúa un poco por encima del fondo para la entrada del crudo que va a ser tratado. Igualmente la columna consta de un número variable de salidas para permitir la obtención de las diferentes fracciones. El lugar donde se encuentra la entrada del crudo así como las salidas de las diferentes corrientes no es producto del azar, sino resultado de un cálculo que va a permitir tratar un determinado tipo de crudo. <sup>[7]</sup>

#### ➤ *Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC)*

Este es un proceso de conversión de hidrocarburos pesados presentes en los gasóleos de vacío, que permite producir gasolina, y en consecuencia aumentar el rendimiento de este combustible en las refinerías, disminuyendo la producción de residuales.

El proceso FCC se basa en la descomposición o rompimiento de moléculas de alto peso molecular; esta reacción se promueve por un catalizador sólido con base en zeolitas en presentación pulverizada, que se incorpora a los hidrocarburos de carga en un reactor de tipo tubular con flujo ascendente. A la salida del reactor, el catalizador se separa de los productos de reacción a través de ciclones, es decir, se traslada continuamente el catalizador del reactor al regenerador y viceversa y el coque que se genera y adhiere al mismo por las altas temperaturas de reacción, se quema en un equipo especial antes de recircularse al reactor; la energía liberada en el quemado sirve para dar parte del calentamiento de la corriente de carga.

En el proceso se producen, además de gasolina, productos más ligeros como gas seco (metano y etano) y fracciones de 3 a 5 átomos de carbono, de carácter

olefínico, que se utilizan como materia prima en la producción de éteres y gasolina alquilada en procesos subsecuentes de la refinería (Apéndice A). También se genera un producto pesado rico en aromáticos, conocido como aceite cíclico ligero, que se procesa en las hidrotratadoras de la fracción diesel, y otro denominado aceite decantado que se incorpora al combustóleo. [7]

### ➤ *Unidad Hidrotratadora de Nafta*

La Unidad Hidrotratadora de Nafta es la primera etapa en el Complejo de Mejoramiento de Nafta que en si misma abarca a la Unidad de Hidrotratamiento de Nafta (NTH) y a la Unidad de Reformación Catalítica (CCR). [7]

- **Hidrotratamiento de Nafta (NHT)**

Es un proceso en donde se hace reaccionar el hidrógeno con hidrocarburos insaturados (olefinas y aromáticos) transformándolos en saturados (parafínicos y nafténicos). Además el hidrógeno reacciona con compuestos de azufre, nitrógeno y oxigenados transformándolos en ácido sulfhídrico ( $\text{SH}_2$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

El objetivo principal del hidrotratamiento de naftas es acondicionar la carga a las unidades de Reformado Catalítico e Isomerización. La remoción de metales, junto con la eliminación de azufre, oxígeno y nitrógeno, es necesaria debido a que estos son venenos para los catalizadores.

La carga está constituida por naftas pesadas de destilación primaria (Topping) y naftas pesadas de las Unidades de Coque. Luego de ser calentada, la carga pasa por un sistema de reacción donde el hidrocarburo toma contacto con el hidrógeno en presencia de un catalizador. La corriente de salida del sistema de reacción pasa por un

separador de alta presión donde se separa el hidrógeno que no reaccionó junto con parte del sulfhídrico y amoníaco formado, luego la corriente pasa a una torre estabilizadora donde se elimina una pequeña cantidad de gases por la parte superior. Por el fondo sale nafta hidrotratada. <sup>[7]</sup>

- **Reformación Catalítica (CCR)**

Es un proceso que consiste en modificar la estructura química de los compuestos que integran las naftas, en el que a condiciones de presión moderada y alta temperatura, se promueven reacciones catalíticas conducentes a la generación de compuestos de mayor octano como son los aromáticos y las isoparafinas. Simultáneamente en las reacciones se produce hidrógeno, que se utiliza en la misma refinería en los procesos de hidrotratamiento. Las reacciones son promovidas por catalizadores basados en gg-alúmina como soporte de metales activos (platino-renio o platino-estaño). La reformación catalítica es también una fuente de benceno, tolueno, xileno. El reformado de alto índice de octanaje obtenido en esta unidad se utiliza como componentes de gasolinas y como carga de las fábricas de aromáticos y disolventes.

Las reacciones son llevadas a cabo en series de tres o cuatros reactores de cama y ya que sus reacciones son endotérmicas, los hornos calentadores son colocados en la entrada de cada reactor. El hidrógeno es reciclado para prevenir formación del carbón en la superficie. En la reformación catalítica el número de átomos de carbono de los constituyentes de la carga no varía, por ejemplo, el ciclohexano se transforma en benceno pero el proceso es algo más complicado. Es posible convertir ciclohexanos sustituidos en bencenos sustituidos; parafinas lineales como el n-heptano se convierten en tolueno y también los ciclopentanos sustituidos pueden experimentar una expansión en el anillo y convertirse en aromáticos. Cuando se emplean naftas pesadas como cargas, se forman metilnaftalenos. Al igual que la

desintegración catalítica, la reformación catalítica es una reacción a través de iones carbono. [7]

### ➤ *Alquilación*

Es un proceso de síntesis química que consiste en la reacción de olefinas ligeras con hidrocarburos saturados dando lugar a hidrocarburos saturados de cadena ramificada con alto índice de octano. Este proceso consiste básicamente en la reacción de una isoparafina, preferentemente isobutano con una n-olefina: propileno, n-buteno o n-penteno, en presencia de ácido de HF o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> como catalizador. Al resultado de la síntesis se denomina alquilado o gasolina alquilada.

El proceso de alquilación comienza con el ingreso a la planta de alquilación de la mezcla butano-butileno, denominada olefina, que proviene del GLP. Allí pasa en primer lugar por la unidad de tratamiento merox, o desulfurización, en donde se retira el azufre mediante un proceso de lavado con sado caustica (Apéndice A). De una concentración de 1000 ppm de compuesto de azufre, queda finalmente con menos de 20 ppm de esta sustancia.

En la segunda unidad se hidrogena la carga para convertir la diolefinas (dos enlaces en cadenas de carbono) en olefinas (enlaces sencillos). Estas diolefinas tienden a polimerizarse, es decir, producir gomas que taponan las tuberías y representan altos consumos de ácido sulfúrico en el proceso de alquilación. Este proceso baja el contenido de diolefinas de 10.000 ppm hasta 35 pmm. La unidad de alquilación propiamente dicha utiliza ácido sulfúrico para convertir las olefinas en alquilato.

Los procesos de alquilación son exotérmicos y fundamentalmente iguales a la polimerización; difieren en que solo parte del material que se alimenta requiere ser



insaturado. Como resultado de ello el producto alquilado no contiene olefinas y tiene mayor valor antidetonante.<sup>[7]</sup>

- **Unidad de Alquilación de la refinería de Puerto La Cruz**

**Tratamiento de olefinas:** Las olefinas después de salir de la unidad de craqueo catalítico se tratan con amina (DEA) para remover el  $H_2S$  y con cáustico para remover los mercaptanos, luego se envían a la torre desetanizadora donde se remueven los compuestos  $C_2$  y más livianos juntos con algo de agua.

**Reacción:** Primero se mezclan las olefinas con el isobutano fresco y el isobutano de reciclaje, posteriormente la mezcla se divide y se mezcla con el ácido fluorhídrico y tiene lugar la reacción de alquilación. El producto de la reacción pasa al tambor asentador se bombea al tambor de recontacto donde se pone en contacto nuevamente con el HF para reducir la cantidad de fluoruros orgánicos que se formaron en el reactor.

**Fraccionamiento:** Se utiliza una torre despropanizadora, una despojadora de isobutano y una desbutanizadora, estas se encargan de separar el propano, isobutano, butano y el alquilato. El alquilato se trata con hidróxido de potasio sólido para remover cualquier traza de HF y se envía al sistema de mezclas de gasolina como un componente de alto octanaje.

**Regeneración de ácido:** El proceso posee una etapa de regeneración de ácido en la cual una pequeña fracción del ácido se envía continuamente a una torre despojadora en donde se remueve el polímero y el agua. Estas salen por el fondo de la torre para ir a un tambor separador donde se separa el polímero de la mezcla azeotrópica agua-ácido, posteriormente se neutraliza, se envía al residual y a

tratamiento de efluentes. Los rendimientos de la unidad de alquilación dependen de la pureza de las olefinas producidas en la Unidad de Craqueo Catalítico.<sup>[7]</sup>

### **2.3.3. Contaminantes atmosféricos primarios y secundarios**

Los *contaminantes primarios* son aquellas sustancias emitidas directamente a la atmósfera desde la fuente contaminante, sea esta de origen natural o antrópico. Estas sustancias son de composición y características muy variadas y las producen diversos tipos de fuentes. Aunque su número es elevado, ocupa la atención principal los siguientes, por cuanto aparecen con mucha frecuencia:

- Partículas suspendidas (sólidas y líquidas).
- Monóxido de carbono (CO).
- Óxidos de nitrógenos (NO, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>).
- Óxidos de azufre (SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>).
- Hidrocarburos (HC).

Estos compuestos químicos suelen encontrarse en niveles dañinos en situaciones de contaminación. Este no es el caso de los hidrocarburos, los cuales raramente aparecen en concentraciones tales que ocasionen problemas por sí mismas; sin embargo siempre se incluyen en la lista de los contaminantes que se deben medir para tener idea del estado de contaminación y esto se debe a que ellos son capaces de reaccionar y producir otras sustancias orgánicas que, pese a estar en concentraciones bajas, son lo suficientemente tóxicas como para ocasionar problemas, tal es el caso de los peroxiacetilnitratos formados a partir de hidrocarburos.

Otras sustancias que aparecen con menos frecuencia por estar asociadas a casos muy concretos de procesos industriales, pero que constituyen también ejemplos de contaminantes primarios son, entre otras, metales pesados como plomo, cromo, níquel, cobre, vanadio, arsénico, cadmio y mercurio; sustancias minerales como

asbestos y amianto; compuestos halogenados y sus derivados como cloro, cloruro de hidrógeno, fluoruro de hidrógeno; compuestos orgánicos como hidrocarburos aromáticos polinucleares; compuestos orgánicos sulfurosos como los mercaptanos; compuestos orgánicos halogenados como los bifenilos policlorados, dioxinas y furanos.

Los contaminantes secundarios son aquellos contaminantes que no son emitidos directamente a la atmósfera desde los focos emisores, sino que aparecen como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas y fotoquímicas que sufren los contaminantes primarios al reaccionar entre sí o con otras sustancias o con la luz.

Ejemplos de este tipo de contaminantes son el ozono ( $O_3$ ), los peroxiacetilnitratos y los radicales libres altamente reactivos, todos los cuales son de carácter oxidante y junto con los aldehídos (R-CHO) se encuentran en situaciones de *smog fotoquímico*, caso típico de una situación en la que se desarrollan innumerables reacciones con producción de contaminantes secundarios. Otro ejemplo de contaminantes secundarios son los aerosoles de ácido sulfúrico y de ácido nítrico que resultan de las transformaciones de los óxidos de azufre y nitrógeno que conducen a las lluvias ácidas. [8]

### 2.3.3.1 Principales tipos de contaminantes del aire

- **Contaminantes gaseosos:** en ambientes exteriores e interiores los vapores y contaminantes gaseosos aparece en diferentes concentraciones. Los contaminantes gaseosos más comunes son el dióxido de carbono, el monóxido de carbono, los hidrocarburos, los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre y el ozono. Diferentes fuentes producen estos compuestos químicos pero la principal fuente artificial es la quema de combustible fósil. La contaminación del aire interior es producida por el consumo de tabaco, el uso de ciertos materiales de construcción, productos de

limpieza y muebles del hogar. Los contaminantes gaseosos del aire provienen de volcanes, incendios e industrias. El tipo más comúnmente reconocido de contaminación del aire es la niebla tóxica (smog). La niebla tóxica generalmente se refiere a una condición producida por la acción de la luz solar sobre los gases de escape de automotores e industrias.

- **Los aerosoles:** Un aerosol es una mezcla heterogénea de partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas como el aire de la atmósfera. Algunas partículas son lo suficientemente grandes y oscuras para verse en forma de hollín o humo. Otras son tan pequeñas que sólo pueden detectarse con un microscopio electrónico. Cuando se respira el polvo, ésta puede irritar y dañar los pulmones con lo cual se producen problemas respiratorios. Las partículas finas se inhalan de manera fácil profundamente dentro de los pulmones donde se pueden absorber en el torrente sanguíneo o permanecer arraigadas por períodos prolongados de tiempo. <sup>[9]</sup>

### **2.3.3.2 Tipos de emisiones atmosféricas provenientes de las unidades de procesos de una Refinería**

#### **a) Emisiones Atmosféricas por Combustión**

Una reacción de combustión es una reacción de oxidación rápida en la que se libera energía luminosa y calorífica.

Los procesos de combustión y de oxidación tienen algo en común: la unión de una sustancia con el oxígeno. La única diferencia es la velocidad con que el proceso tiene lugar. Así, cuando el proceso de unión con el oxígeno es lo bastante lento como para que el calor desprendido durante el mismo se disipe en el ambiente sin calentar apreciablemente el cuerpo, se habla de *oxidación*. Si el proceso es rápido y va

acompañado de un gran aumento de temperatura y en ocasiones de emisión de luz (llama), recibe el nombre de *combustión*.

Las reacciones químicas implicadas en la combustión no suelen producirse de forma espontánea como ocurre en la oxidación. Una fuga de gas puede permanecer un tiempo considerable sin que se produzca reacción alguna, pues es necesario un iniciador, como puede ser el contacto con una llama o chispa accidental, para que la combustión de comienzo.

Normalmente se requiere un aporte continuo de calor hasta que en un punto del material se alcanza la temperatura de inflamación y se produce la ignición. Una vez iniciada, la combustión se autoalimenta debido al carácter exotérmico de las reacciones de oxidación, generando calor y transmitiéndolo a otras partes del mismo combustible. Bajo determinadas condiciones de presión y temperatura, la combustión de ciertas sustancias puede ser extremadamente rápida, generando grandes cantidades de energía calorífica y de gases que se expanden y que pueden hacer estallar el recipiente que los contiene. <sup>[8]</sup>

### ***Combustión Completa e Incompleta***

En toda combustión existe un elemento que arde (combustible) y otro que produce la combustión (comburente), generalmente oxígeno en forma de  $O_2$  gaseoso. Los tipos más frecuentes de combustible son los materiales orgánicos que contienen carbono e hidrógeno. En una reacción completa todos los elementos tienen el mayor estado de oxidación. Los productos que se forman son el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y el agua, el dióxido de azufre ( $SO_2$ ) (si el combustible contiene azufre) y pueden aparecer óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), dependiendo de la temperatura de reacción.

En la combustión incompleta los productos que se queman pueden no reaccionar con el mayor estado de oxidación, debido a que el comburente y el combustible no están en la proporción adecuada, dando como resultado compuestos como el monóxido de carbono (CO).<sup>[8]</sup>



### ***Principales Fuentes Fijas que dan origen a la Combustión***

- ***Mechurrio (Flare):*** Son conductos constituidos para dar salida a la atmósfera libre a gases resultantes de una combustión o de una reacción química, para su dispersión en el aire. Este quemador se instala en las afueras de la planta, a una posición elevada, para disponer los gases combustibles de desechos de plantas químicas o refinerías, mediante la ignición de los mismos.

- ***Hornos:*** Son dispositivos mediante el cual la energía suministrada por un combustible al quemarse o por una corriente eléctrica, se utiliza para elevar la temperatura en su interior, con lo que es posible efectuar en el operaciones físicas o procesos químicas que exigen temperaturas elevadas. Las temperaturas de combustión que se alcanzan en los hornos están comprendidas entre 400°C y 2000°C. también se consideran equipos industriales en los que se entrega el calor generado por la oxidación de un combustible a una carga de crudo que circula por dentro de unos tubos de una manera similar a una caldera.

- ***Calderas:*** Las calderas industriales son generadoras de vapor, también son descritas como una combinación de equipos que se utilizan para recuperar calor, que emplean, al mismo tiempo, aparatos para transmitir el calor disponible. Se compone de una cámara de combustión, la cual se encuentra en contacto directo con la flama y quemadores en donde se lleva a cabo la combustión.

Los combustibles que se emplean pueden ser de tipo líquido, sólido o gaseoso, también poseen tubos, atemperadores y bancos generadores. Son ampliamente utilizados en plantas que realizan calentamiento de fluidos y aire, vaporización, deaeración del agua, trazado de vapor, generadores de vacío y mantenimiento de otros equipos.

- **Turbogenerador:** Equipo utilizado para la generación de energía eléctrica. El término *turbo* se aplica en su nombre porque es impulsado por una turbina y el término *generador* porque el dispositivo impulsado por la turbina, es llamado generador. Su funcionamiento es muy sencillo, los gases de escape mueven la turbina, que gira solidaria al generador. Al girar este, produce electricidad, lo que supone convertir parte de la energía cinética de los gases de escape en energía eléctrica.

En el turbogenerador también se encuentran integrados algunos sistemas auxiliares y complementarios tales como, sistemas de enfriamiento, sistema de lubricación, sistema de medición y tablero del turbogenerador. <sup>[10]</sup>

## **b) Emisiones Fugitivas**

Las emisiones fugitivas son aquellas fugas o escapes, generalmente pequeños, que se producen en forma continua y que se emiten directa o indirectamente a la atmósfera, procedentes de equipos o componentes de una instalación que opera con contaminantes orgánicos o inorgánicos volátiles 300 horas o más al año en el proceso de producción. Estos componentes por lo general son: válvulas, bridas, tapones de líneas, instrumentos, bombas, venteos de tanques y líneas, entre otros. <sup>[10]</sup>

### ***Fuentes de Emisiones Fugitivas***

Las emisiones fugitivas se generan en:

- Cualquier equipo en el que pueda producirse una fuga.

- En las conexiones de tuberías.
- Evaporación de compuestos en tanques abiertos o recipientes.
- Emisiones de polvo en construcción, demolición, tráfico, recogida de residuos, agricultura. <sup>[10]</sup>

*Ecuaciones principales para el cálculo de emisiones fugitivas establecidas por la Norma EPA (2003).*

Emisiones de COV:

$$ECOV_i = Ni * Hop * FE_{COVC} * Fc \quad \text{Ec. 2.2}$$

Hop = Horas de operación

Según la norma EPA, se ajusta un valor de 8760 horas/año en caso de no conocer las horas de operación exactas en las unidades de procesos. <sup>[11]</sup>

Ni = Número de componentes.

Emisión de C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>:

$$EC_{C_6H_6i} = ECOV_i * \%W_{C_6H_6} \quad \text{Ec. 2.3}$$

De acuerdo a lo establecido en la norma EPA el porcentaje en peso de benceno en COV es de 3% por defecto. <sup>[11]</sup>

**Factor de emisión de CH<sub>4</sub>:**

$$FE_{CH_4i} = FE_{COV_i} * \left[ \frac{Wf_{CH_4c}}{(Wf_{TOC} - Wf_{CH_4c})} \right] * N \quad \text{Ec. 2.4}$$



El valor de  $Wf_{TOC}$  es igual a 1 por defecto, según la norma EPA (2003).<sup>[11]</sup>

Donde:

$FE_{CH_4}$  = Factor de emisión de  $CH_4$

$FE_{COV}$  = Factor de emisión de COV

$Wf_{CH_4}$  = Peso en fracción de  $CH_4$

$Wf_{TOC}$  = Peso en fracción de TOC

$N$  = Número de componentes<sup>[11]</sup>

#### Emisión de $CH_4$ :

$$E_{CH_4i} = FE_{CH_4i} * H_{op} * F_c \quad \text{Ec. 2.5}$$

### 2.3.4. Principales Gases Contaminantes provenientes de los procesos de refinación

#### *Monóxido de carbono (CO):*

Es uno de los productos de la combustión incompleta. Se diluye muy fácilmente en el aire ambiental, pero en un medio cerrado, su concentración lo hace muy tóxico, incluso mortal.

Los motores de combustión interna de los automóviles emiten monóxido de carbono a la atmósfera por lo que en las áreas muy urbanizadas tiende a haber una concentración excesiva de este gas hasta llegar a concentraciones de 50-100 ppm, tasas que son peligrosas para la salud de las personas.

***Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>):***

Es un gas incoloro e inodoro y con un sabor ácido, que a concentraciones bajas no es tóxico, pero en concentraciones elevadas incrementa la frecuencia respiratoria y puede llegar a producir sofocación; además es uno de los causantes del efecto invernadero.

La concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera está aumentando de forma constante debido al uso de carburantes fósiles como fuente de energía y es teóricamente posible demostrar que este hecho es el causante de producir un incremento de la temperatura de la Tierra “efecto invernadero”

***Monóxido de nitrógeno (NO):***

También llamado óxido de nitrógeno (II) es un gas incoloro y poco soluble en agua que se produce por la quema de combustibles fósiles en el transporte y la industria. Se oxida muy rápidamente convirtiéndose en dióxido de nitrógeno, NO<sub>2</sub>, y posteriormente en ácido nítrico, HNO<sub>3</sub>, produciendo así lluvia ácida.

***Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>):***

Es un compuesto químico formado por los elementos nitrógeno y oxígeno, uno de los principales contaminantes entre los varios óxidos de nitrógeno. El dióxido de nitrógeno es de color marrón-amarillento, se forma como subproducto en los procesos de combustión a altas temperaturas, como en los vehículos motorizados y las plantas industriales.

***Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>):***

Es un gas incoloro con un característico olor asfixiante. Se trata de una sustancia reductora que, con el tiempo, el contacto con el aire y la humedad, se convierte en trióxido de azufre. Gas corrosivo que se produce por la quema de combustibles, como el carbón y el petróleo, que contienen azufre. También se produce a partir de las salpicaduras del mar, la descomposición orgánica y las erupciones volcánicas.

Cuando se combina con agua en el aire, produce un ácido sulfúrico débil, corrosivo, que es uno de los ingredientes de la lluvia ácida.

***Sulfuro de Hidrógeno (H<sub>2</sub>S):***

El sulfuro de hidrógeno es un gas incoloro, inflamable, con mal olor, de sabor dulce y perceptible a concentraciones de 0.002 mg/l, se conoce por la fórmula H<sub>2</sub>S, además de poseer un 5.92% de hidrógeno, 94.09% de Azufre y un peso molecular de 34.08 g/mol. El H<sub>2</sub>S cuando es separado del gas natural mediante el proceso de endulzamiento, es enviado a plantas recuperadoras de azufre donde es vendido en forma líquida para sus diversos usos industriales.

***Metano(CH<sub>4</sub>):***

El metano, CH<sub>4</sub>, es un gas que se forma cuando la materia orgánica se descompone en condiciones en que hay escasez de oxígeno; esto es lo que ocurre en las ciénagas, en los pantanos y en los arrozales de los países húmedos tropicales. También se produce en los procesos de la digestión y defecación de los animales herbívoros.

***Compuestos Orgánicos Volátiles (COV):***

Los Compuestos Orgánicos Volátiles son sustancias químicas que contienen carbono y se encuentran en todos los elementos vivos. Los compuestos orgánicos volátiles, a veces llamados COVs se convierten fácilmente en vapores o gases. Junto con el carbono, contienen elementos como hidrógeno, oxígeno, flúor, cloro, bromo, azufre o nitrógeno. Los Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), son liberados por la quema de combustibles, como gasolina, madera, carbón o gas natural. También son liberados por disolventes, pinturas, pegantes y otros productos empleados y almacenados en la casa y el lugar de trabajo.

***Benceno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>):***

El benceno es un hidrocarburo aromático poliinsaturado de fórmula molecular C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, con forma de anillo (se le llama anillo bencénico, o aromático, ya que posee un olor característico) y puede considerarse una forma poliinsaturada del ciclohexano. Es un líquido incoloro y muy inflamable de aroma dulce, con un punto de fusión relativamente alto. [8]

**2.3.5 Efectos causados por los principales contaminantes provenientes de los procesos industriales sobre la salud humana**

La contaminación del aire causa muchos efectos en la salud, desde irritaciones leves, hasta el desarrollo de graves enfermedades.

***Monóxido de Carbono:*** Es un producto de la combustión de materiales fósiles como el petróleo y es común que se forme a partir de los vehículos en movimiento. En consecuencia, este producto se acumula en las zonas urbanas, cerca de las vías

rápidas y de calles de gran movimiento y su concentración varía conforme aumenta o disminuye la circulación.

Este gas no parece afectar a las plantas, pero es muy tóxico para los seres humanos, ya que interfiere con el transporte de oxígeno en la sangre. Los efectos en la salud se hacen más graves conforme mayor sea la cantidad de monóxido de carbono en el aire y el tiempo de la exposición.

***Dióxido de Azufre:*** Es el derivado del azufre que más frecuentemente contamina el aire. Se produce por la combustión de carbono y petróleo que lo contienen. La mayor parte proviene de las plantas generadoras de electricidad (carboeléctricas y termoeléctricas) y de otros procesos industriales que contribuyen a la presencia de sulfatos en la atmósfera, como la calcinación de los minerales de sulfuro, la refinación del petróleo, la producción de Óxido Sulfúrico y la de coque a partir del carbón.

Los óxidos de azufre se eliminan del aire mediante su conversión en ácido sulfúrico y sulfatos y de esta forma se depositan en forma de partículas sobre la tierra o en el mar, ya sea con la precipitación pluvial o sedimentándose, contaminando también el agua y el suelo.

Los efectos tóxicos de los óxidos de azufre para el ser humano son: dificultad para respirar, debido al espasmo o contracción de los bronquios, irritación de la garganta, de los ojos y tos, en cantidades elevadas puede llegar a ser mortal. También se ha encontrado una relación entre la presencia de óxidos de azufre en la atmósfera y el aumento de muertes por enfermedades crónicas, cardiovasculares y respiratorias.

***Dióxido de nitrógeno:*** Es un gas tóxico, irritante y precursor de la formación de partículas de nitrato. Estas llevan a la producción de ácido y elevados niveles de PM-

2.5 en el ambiente. Afecta principalmente al sistema respiratorio. La exposición a corto plazo en altos niveles causa daños en las células pulmonares, mientras que la exposición a más largo plazo en niveles bajos de dióxido de nitrógeno puede causar cambios irreversibles en el tejido pulmonar similares a un enfisema.

***Los hidrocarburos:*** Son contaminantes primarios; su importancia radica en la gran cantidad de fuentes y el volumen de sus emisiones al aire. Se forman por la combustión de productos como la gasolina, el petróleo, el carbono y la madera y la mayor producción se debe a las actividades de la industria petrolera, así como a los vehículos de motor.

Algunos hidrocarburos son tóxicos para las plantas y animales a concentraciones relativamente altas y en el ser humano parece que provoca problemas en vías respiratorias.

Otros contaminantes muy importantes son elementos como el plomo, el cadmio y el fluor, de origen industrial y a los que se ha relacionado con afecciones cardiacas, hipertensión arterial, arterioesclerosis, cáncer broncopulmonar, anormalidades en los huesos y afección de los riñones.

***Partículas suspendidas:*** Otros contaminantes del aire son partículas sólidas y líquidas suspendidas y dispersas. A ellas se debe el aspecto nebuloso y brumoso del aire contaminado. Se producen junto con los contaminantes gaseosos del aire, debido a diferentes actividades, sobre todo la fabricación de hierro y acero, la producción de cemento, la extracción de rocas y minerales, el almacenamiento y la manipulación de granos y la elaboración de pulpa de papel.

***Partículas líquidas:*** Dentro de éstas principalmente se encuentran los aerosoles, que se manifiestan en forma de vapores, niebla o vahos que en grandes concentraciones pueden llegar a transformarse en un agente letal, como sucedió en

Londres en 1940, 1950 y 1952, que se produjeron miles de muertes debido a la presencia de estas nieblas tóxicas.

Los aerosoles son verdaderas nebulizaciones y por su tamaño tan pequeño, penetran en los bronquios y los irritan. Las partículas mayores son detenidas por la mucosa nasal y la laringe causando gran irritación.

**Sulfuro de hidrógeno:** La exposición del sulfuro de hidrogeno produce generalmente dolor de cabeza, náuseas, vértigo, mareos, debilidad, desorientación hipotensión e irritación respiratoria. La lesión pulmonar puede progresar a lo largo de algunas horas. La intoxicación grave con sulfuro de hidrogeno puede causar inconsciencia, fallos respiratorios y cardiovascular. El ácido sulfhídrico es extremadamente nocivo para la salud, bastan 20-50 ppm en el aire para causar un malestar agudo que lleva a la sofocación y la muerte por sobreexposición.

**Benceno:** puede causar taquicardia, dolores de cabeza, irritación del sistema respiratorio, ojos, nariz y piel, vértigo, narcosis, dermatitis, anorexia, edema pulmonar, fatiga, debilidad, perturbaciones mentales, náuseas, cambios cromosómicos, parálisis respiratoria, muerte, entre otros. El consumo de bebidas alcohólicas aumenta el efecto nocivo. Es un cancerígeno conocido, está reportado como causante de leucemia aguda después de 2 años de exposición continua. El benceno produce alteraciones en la médula de los huesos y puede generar una disminución del número de glóbulos rojos, lo que a su vez puede provocar anemia. <sup>[8]</sup>

### **2.3.6. Análisis De Dispersión**

En el establecimiento de modelos que permitan predecir la concentración de contaminantes en el aire, la meteorología juega un papel fundamental. Los dos parámetros de máximo interés para los especialistas en contaminación son: la

estabilidad atmosférica y la velocidad del viento. En general, las atmósferas estables (gradientes verticales de temperatura o inversiones bajas) y las velocidades bajas de viento conducen a concentraciones más altas a nivel del suelo (de fuentes a nivel de suelo o bajo nivel). Las atmósferas inestables y las velocidades altas de viento conducen a concentraciones más bajas a nivel de suelo. Existen otros parámetros considerados durante la realización de los modelos, entre ellos: temperatura del aire / suelo, humedad relativa, dirección del viento predominante y efectos topográficos en la meteorología.<sup>[10]</sup>

Casi todos los modelos son balances de materiales, es decir, una contabilidad del contaminante en estudio en unidades de masa/tiempo, ejemplo: g/s. La ecuación general es la siguiente:

$$\begin{aligned} (\text{Velocidad de acumulación}) = & (\text{Gastos de entrada}) - (\text{Gastos de salida}) \\ & + (\text{Velocidad de creación}) - (\text{Velocidad de} \\ & \text{destrucción}) \quad (2.6) \end{aligned}$$

El predecir la evolución de un contaminante dentro de la atmósfera es casi imposible, debido a los complejos factores involucrados: la meteorología, el origen de las emisiones, y el proceso.<sup>[12]</sup>

Las emisiones de contaminantes en la atmósfera son de interés a tres escalas:

- **Microescala:** del orden de 1 km (Ej. penachos de chimeneas).
- **Mesoescala:** del orden de 100 km (Ej. vientos montaña / valle).
- **Macroescala:** del orden de miles de km (Ej. altas / bajas sobre océanos y continentes).



El problema de la dispersión de los contaminantes atmosféricos requiere ser modelado debido a la creciente preocupación por la calidad del aire, la salud poblacional, la protección del medio, la visibilidad y el impacto de los contaminantes. [12].

Se han desarrollado muchas técnicas para predecir la concentración de contaminantes en un punto, que incluyen modelos matemáticos para estimar la calidad del aire, algunas son:

- **Modelo gaussiano:** se emplea en su mayoría para la estimación de contaminantes no reactivos.
- **Modelo numérico:** se requieren resolver ecuaciones de balance de materia, energía y cantidad de movimientos tridimensionales.
- **Modelo estadístico o modelo empírico:** se emplean si las ecuaciones sobre los procesos fisicoquímicos es inadecuada para utilizar un modelo gaussiano o numérico.
- **Modelo físico:** se utilizan túneles de viento para la investigación.

#### **2.3.6.1. Modelo Gaussiano:**

Se considera una fuente puntual, como la chimenea de una fábrica (que en realidad no es un punto sino un área pequeña) y se intenta calcular la concentración en la dirección del viento que resulta. El modelo gaussiano realiza las siguientes suposiciones:

- No existe variación ni en la velocidad ni en la dirección del viento entre el foco y el receptor.

- Todo el vertido permanece en la atmósfera, es decir, no reacciona ni se deposita en forma de lluvia o partículas. Cualquier penacho que impacta en el terreno rebota en su totalidad.
- La dispersión describe exactamente una distribución de Gauss.

Lo normal es que las columnas de humo suban una distancia considerable por encima de la chimenea, porque son emitidas a temperaturas más elevadas que las atmosféricas y con una velocidad vertical. La altura efectiva ( $h_e$ ) de la pluma es:

$$h_e = h_s + \Delta h \quad (2.7)$$

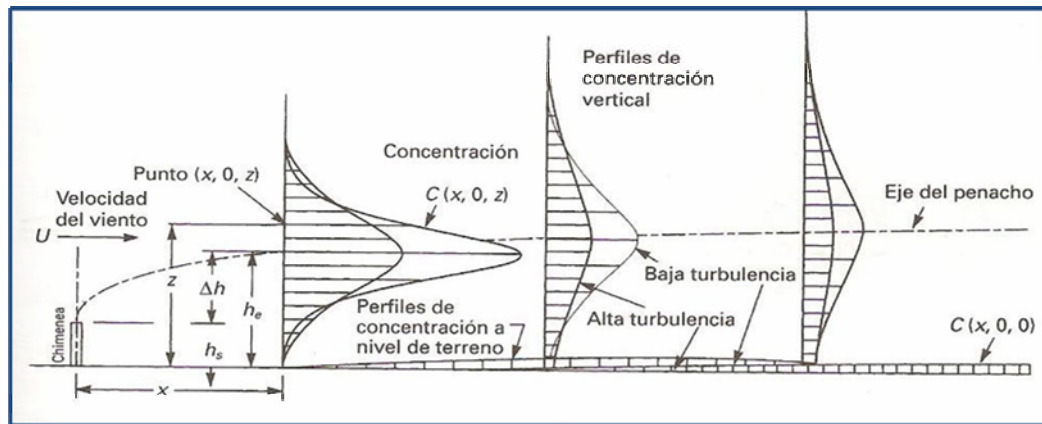
Dónde:  $h_e$  = altura efectiva del penacho

$h_s$  = altura de la chimenea

$\Delta h$  = ganancia en altura del penacho debido a su velocidad y Flotabilidad

A medida que la pluma avanza aguas abajo en la dirección del viento, se asume que el perfil de concentración por difusión adquiere una distribución gaussiana (figura 2.2). Si el desarrollo del penacho se efectúa en las tres dimensiones, el modelo debe tomar en cuenta los cambios en los tres ejes ( $x, y, z$ ), Entonces, la concentración de un contaminante ( $C$ ) en cualquier punto sería proporcional al caudal ( $Q$ ) y a la curva de Gauss ( $G$ ) e inversamente proporcional a la velocidad del viento ( $U$ ) <sup>[12]</sup>:

$$C(x, y, z) \propto \frac{1}{U} QG \quad (2.8)$$



**Figura 2.2.** Esquema de elevación del perfil de concentración de un penacho. [12]

De esta forma, la concentración del contaminante en una pluma en cualquier punto \$x\$, \$y\$ o \$z\$ puede calcularse con la siguiente ecuación de difusión:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z U} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right]$$

(2.9)

Donde: \$Q\$ = cualquier propiedad por unidad de tiempo, e.j. Kg. /s, \$m^3/s\$.

\$C\$ = cualquier propiedad por unidad de volumen, e.j. Kg. /\$m^3\$, \$m^3/m^3\$ o

Ppb.

\$\sigma\_y\$, \$\sigma\_z\$ = coeficientes de difusión, en m, en función de la distancia \$x\$ aguas abajo del viento.

El sistema de coordenadas para la ecuación 5 está dado por:

\$x = 0\$ en el foco (chimenea)

\$y = 0\$ en la línea central de la pluma

\$z = 0\$ en el terreno

Cuando la altura efectiva del foco emisor es H, entonces la coordenada z en la línea central de la pluma es (z – H), y la ecuación 5 queda de la siguiente forma:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (2.10)$$

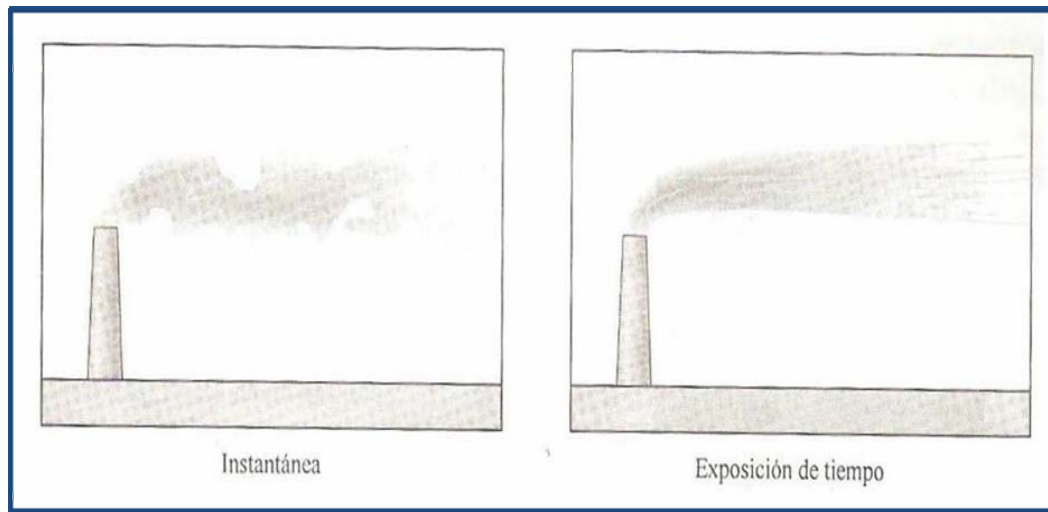
Los coeficientes de dispersión,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ , pueden ser obtenidos mediante gráficos basados en las clases de estabilidad (figuras 2.11 y 2.12). La estabilidad está relacionada tanto con la turbulencia atmosférica como con el gradiente vertical de temperatura y las situaciones de inversión térmica. Una atmósfera “neutra” ocurre cuando el gradiente de temperatura ambiental es igual al gradiente de temperatura seca adiabática, es decir, la velocidad de enfriamiento es igual a 1°C/ 100 m, aproximadamente. En este caso, si el volumen de aire se desplaza en sentido ascendente o descendente, su temperatura se ajustará a la de los alrededores. En cualquier nueva posición, no experimenta ninguna fuerza que lo incite a ajustar su posición nuevamente, es decir, la gravedad no intentará moverlo hacia abajo o hacia arriba <sup>[4]</sup>. A continuación en la tabla 2.1 se muestran las categorías de Pasquill de estabilidad de la atmósfera. <sup>[12]</sup>:

**Tabla 2.1.** Clases de estabilidad de Pasquill <sup>[13]</sup>.

A	Extremadamente inestable			D	Condiciones neutras	
B	Moderadamente inestable			E	Ligeramente estable	
C	Ligeramente inestable			F	Moderadamente estable	
Velocidad del viento (m/s)	<b>Insolación diurna</b>			<b>Día o Noche</b>	<b>Condiciones nocturnas</b>	
					<b>Nubosidad</b>	
	<b>Fuerte</b>	<b>Moderado</b>	<b>Ligero</b>	<b>Cubierto (8/8)</b>	<b>Semi nub.</b>	<b>Despejado</b>
					<b>&gt; 4/8</b>	<b>3/8</b>

< 2	A	A-B	B	D	-	-
2-3	A-B	B	C	D	E	F
3-4	B	B-C	C	D	D	E
4-6	C	C-D	D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D	D

La difusión molecular en la columna de humo no representa la única causa del mezclado con el aire circundante, la razón más importante es el mezclado turbulento a gran escala. En una toma instantánea de tiempo la pluma aparecerá con una forma similar a una serpiente, pero se va rotando de manera aleatoria causado por el movimiento turbulento de la atmósfera, sin embargo, la forma global sería semejante, lo que genera que en el tiempo parezca uniforme y simétrica (figura 2.3). Los resultados obtenidos por los cálculos de columna de humo gaussiana deben considerarse como promedios durante períodos de al menos 10 minutos y, de preferencia 30 minutos.<sup>[10]</sup>



**Figura 2.3.** Comparación de una exposición instantánea y una de tiempo de una columna visible de humo. <sup>[10]</sup>

La técnica gaussiana es la que se usa mayormente para contaminantes no reactiva, proporciona una excelente aproximación matemática a la dispersión de contaminantes. La mayoría de modelos recomendados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos son gaussiano. <sup>[10]</sup>

#### 2.3.6.2 Modelos numéricos.

Este tipo de modelos es usado cuando los contaminantes analizados están reaccionando y formando contaminantes secundarios. Son mucho más apropiados que los modelos gaussiano para análisis de una fuente de área urbana cuando están involucrados contaminantes reactivos; pero requieren bases de datos mucho más extensos y complejos, por lo cual no son usados ampliamente.

Sus aplicaciones más comunes son para la formación de ozono y en el estudio de la conversión de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  para formar sulfatos y nitratos que contribuyen a la lluvia ácida.

Los modelos numéricos son obtenidos a partir de las características químicas y físicas, relacionadas con los fenómenos de transporte, difusión, transformación y remoción de contaminantes.<sup>[14]</sup>

### **2.3.6.3 Modelos estadísticos o empíricos.**

Las técnicas estadísticas o empíricas son frecuentemente empleadas donde los procesos químicos y físicos no poseen una clara interpretación científica, o en situaciones donde no se cuenta con una fiable y completa base de datos.

Están basados en técnicas estadísticas o semi-empíricas para analizar tendencias, relaciones de la calidad del aire, las mediciones atmosféricas y para predecir la evolución de situaciones de contaminación de corto plazo. Lo anterior se hace utilizando análisis de distribución de frecuencias, análisis de series de tiempo y otros métodos estadísticos.

Los modelos empíricos sólo pueden ser aplicados en las localidades que dieron origen a las base de datos utilizadas, y únicamente un estudio profundo de los criterios de elaboración de estos modelos pueden lograr su extrapolación a otros sitios.

Poseen limitaciones por cuanto no se pueden establecer relaciones causa-efecto; sin embargo son muy útiles para realizar predicciones de corto plazo en tiempo real en donde se cuenta con información de concentraciones y sus tendencias.<sup>[15]</sup>

#### **2.3.6.4. Modelos físicos.**

Los modelos físicos tratan de simular los procesos atmosféricos por medio de una representación a escala reducida de la verdadera situación.

Estos modelos involucran el uso de túneles de viento, canales de agua u otros medios para modelar fluidos. Requieren un alto nivel técnico especializado, así como el acceso a los recursos necesarios. Pueden ser muy útiles para simular situaciones de flujo complejo, con terrenos muy irregulares, donde se presentan edificaciones o sobre alturas del terreno sobresalientes. Es aplicable a un grupo de fuentes agrupadas en unos pocos kilómetros cuadrados.

Esta es la mejor técnica y la más aproximada a la realidad, sin embargo, es poco utilizado por los recursos que se deben disponer. Una de las limitaciones de los modelos físicos radica en la casi nula capacidad de relacionar las emisiones con la calidad del aire, ya que no pueden incluirse las condiciones meteorológicas ni las fuentes existentes en una zona.<sup>[14]</sup>

#### **2.3.7. Software DISPER 4.0**

El programa DISPER 4.0 nos da la posibilidad de estudiar numéricamente una gran cantidad de emisores de contaminantes atmosféricos que afectan a nuestro medioambiente actual. La base del modelo es el uso de una ecuación gaussiana e independiente del tiempo que simula el penacho de humo que se genera en la atmósfera por un emisor. Con algunas modificaciones, el modelo puede utilizarse para simular emisiones de chimeneas industriales, vías de tráfico, carreteras, líneas férreas, minas a cielo abierto, vertederos emisores de gases al aire. Las fuentes emisoras las agruparemos en tres tipos: fuentes puntuales, líneas emisoras y áreas



emisoras. Los algoritmos matemáticos los describiremos en detalle en las siguientes secciones. En el caso de fuentes puntuales, las desarrollaremos a continuación.

El modelo DISPER 4.0 admite datos meteorológicos para establecer las condiciones de la forma de la nube contaminante. El programa establece la concentración de contaminante en cada punto afectado del terreno producido por cada una de las fuentes emisoras teniendo en cuenta las propiedades del contaminante y el estado de la atmósfera. Existe la posibilidad de realizar promedios temporales (diarios, mensuales o anuales) de tal manera que se puede establecer la concentración de contaminante promedio en cada punto del terreno. El modelo DISPER hace uso de una ecuación Gaussiana independiente del tiempo para cada uno de los puntos emisores. Para cada punto emisor y en cada instante de tiempo el origen de coordenadas se situará en la superficie del suelo en la base de la chimenea emisora. El eje X será positivo en la dirección hacia la que sopla el viento y el eje Y será transversal al anterior (perpendicular al viento) mientras que el eje Z tendrá la dirección vertical. Cada uno de los puntos receptores y en cada instante de tiempo tendrán que referirse a este sistema de coordenadas. Cuando hay más de un punto emisor, la concentración de contaminante en cada punto receptor será igual a la suma de contaminante producida por cada uno de los puntos emisores en dicho punto. En la figura 2.4 se puede apreciar el mapa de las concentraciones de Óxidos de Nitrógeno (NOx) generadas por tres chimeneas industriales que emite 1 g/s de NOx bajo un viento de 5 m/s en dirección E y en un terreno con pendiente. <sup>[16]</sup>

## **CAPITULO III.**

### **DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Identificación de las principales fuentes de emisiones atmosféricas provenientes de las unidades de procesos de la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui.**

Esta etapa comprende el diagnóstico de la caracterización de emisiones atmosféricas registradas y que fueron aportadas por la Refinería de Puerto La Cruz, mediante un informe técnico rutinario del comportamiento de las emisiones para el 26 de Abril de 2010, con la finalidad de identificar las principales fuentes de emisión provenientes de cada unidad de procesos, las cuales fueron objeto de estudio para dar inicio al desarrollo de la investigación.

La Refinería de Puerto La Cruz, cuenta con numerosos procesos, entre ellos: Unidad DA-1, Unidad DA-2, Unidad DA-3, Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado, Servicios Industriales, Hidroprocesos, Alquileración y Unidad GLP. Dicho informe arrojó como Unidades con mayor nivel de emisiones contaminantes las siguientes:

- Unidad de Destilación Atmosférica 1 (DA-1).
- Unidad de Destilación Atmosférica 2 (DA-2).
- Unidad de Craqueo Catalítico (FCC).
- Servicios Industriales (RPLC).
- Hidroprocesos.
- Planta de Alquileración.
- Unidad de GLP.

### **3.2. Cuantificación de las concentraciones de los gases contaminantes (CO, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>) provenientes de las principales unidades de procesos.**

Una vez identificadas las principales fuentes de emisión, se procedió a cuantificar para cada proceso, las concentraciones de los gases contaminantes (CO, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>) producto de la combustión, derivadas de las fuentes seleccionadas. El informe técnico aportado por la Refinería muestra dos (2) corridas realizadas en la misma fecha (26/04/2010) mediante el equipo Tempest 100 de marca TELEGAN GAS MONITORING, basado en el método electroquímico (Apéndice B).

#### **3.2.1. Cálculo de las Concentraciones Promedios de los Gases (CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S) entre ambas corridas.**

Para esto se realizó una adición entre las concentraciones de ambas corridas para cada componente, en las fuentes de emisión seleccionadas para luego obtener el promedio dividiendo esta suma entre dos (2). Este procedimiento se aplicó a cada uno de los contaminantes atmosféricos por cada fuente fija de cada unidad de procesos.

### **3.3. Investigación de las emisiones fugitivas (COV, CH<sub>4</sub> y C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) provenientes de los accesorios y equipos principales de las unidades de procesos, según lo establecido en la norma EPA (2003).**

En esta etapa se elaboró un inventario de equipos y accesorios que conforman las unidades de procesos estudiadas, con el propósito de establecer los factores de emisión de los gases (COV, CH<sub>4</sub> y C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) para cada tipo de accesorio o equipo establecidos por la norma EPA (2003) (Apéndice C) y así determinar las emisiones de los gases antes mencionados por concepto de emisiones fugitivas. Para ello se tomó en cuenta los siguientes factores:

- **Factores de emisión de COV**

De acuerdo a lo establecido a la Norma EPA (2003) se tiene para cada componente un factor de COV en lb/hr, según el tipo de fluido con su correspondiente porcentaje en peso de metano (Apéndice B).

- **Factor de emisión de Metano (CH<sub>4</sub>)**

Otro factor importante a considerar para el cálculo de las emisiones fugitivas, lo constituye el factor de emisión de metano el cual se calcula mediante la ecuación 2.4 expresado en lb/hr.

- **Horas de Operación (Hop):**

Según la norma EPA, se ajusta un valor de 8760 horas/año en caso de no conocer las horas de operación exactas en las unidades de procesos.

- **Factor de conversión (Fc):**

$$1 \text{ lb} = 4.54\text{E-}04 \text{ toneladas}$$

- **Emisiones de COV, CH<sub>4</sub> y C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> (E<sub>COV</sub>, E<sub>CH<sub>4</sub></sub>, E<sub>C<sub>6</sub>H<sub>6</sub></sub>) para componentes:**

*Emisiones de COV:* Para el cálculo de esta emisión, se utilizó la ecuación 2.2.

*Emisión de C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>:* Se utilizó la ecuación 2.3 para obtener dicha emisión.

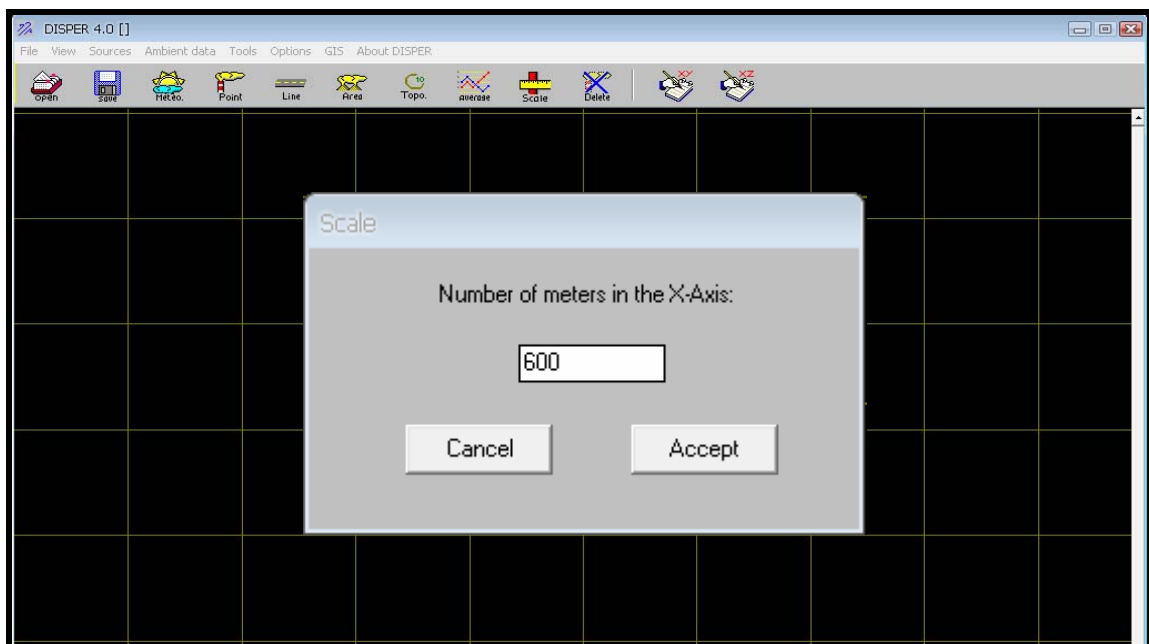
*Factor de emisión de CH<sub>4</sub>:* Este factor se calculó por medio de la ecuación 2.4.

*Emisión de CH<sub>4</sub>:* Por último la emisión de metano, a través de la ecuación 2.5.

### 3.4. Modelado del comportamiento de los gases contaminantes emanados durante la combustión, a través del software DISPER 4.0

Se introdujo el flujo de salida de cada contaminante, emitido durante la combustión proveniente de los procesos estudiados, en la base de datos de la versión del Software DISPER 4.0 limitado a 600 metros, con el cual se disponía (Figura 3.1); esto con el propósito de visualizar gráficamente el comportamiento de estos gases, determinando así el área de impacto (Apéndice D). Posteriormente, se determinó el nivel de calidad del aire del área que abarca ésta longitud, bajo la normativa ambiental correspondiente, Decreto 638 (Apéndice E). Sin embargo, este programa permite visualizar la dispersión de gases contaminantes a una distancia de 10 km.

Es importante acotar que el área de impacto evaluada a 600 m no es representativa, en vista de que ésta distancia no abarca las zonas aledañas más afectadas por estas emisiones.



**Figura 3.1.** Distancia limitada por el Software DISPER 4.0 empleado. <sup>[16]</sup>

Entre los parámetros considerados para llevar a cabo la simulación, se tienen los siguientes: estabilidad atmosférica K de Pasquill-Gifford, temperatura ambiente, velocidad y temperatura del gas de salida, velocidad del viento, altura de la capa límite, altura del anemómetro, altura y diámetro de la fuente fija, flujo de emisión del contaminante y altura sobre el nivel del mar (altitud), muchos de estos aportados por la Refinería de Puerto La Cruz. Los valores tomados por defecto, se muestran a continuación en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Valores fijados por defecto en el Software DISPER 4.0.

Temperatura ambiente (K)	300
Velocidad del gas de salida (m/s)	15
Temperatura del gas de salida (m/s)	432
Velocidad del viento (m/s)	5
Altura de la capa límite (m)	250
Altura del anemómetro (m)	10

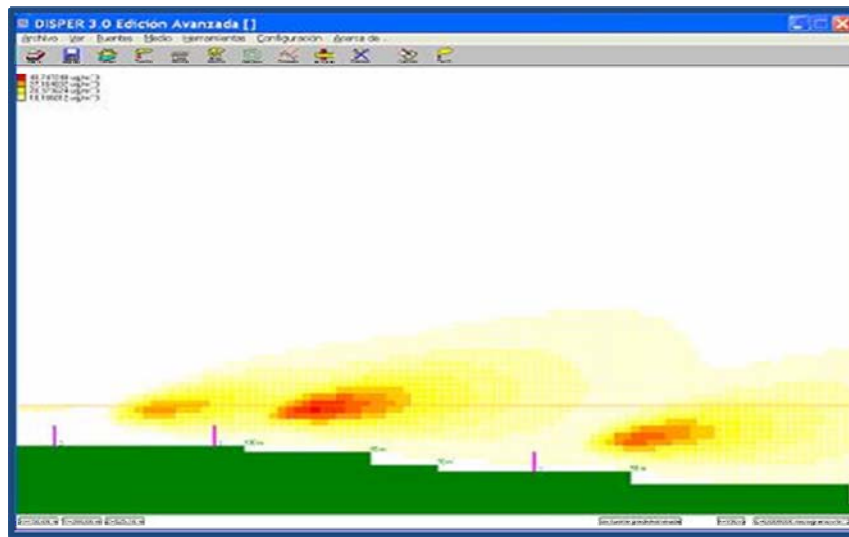
#### **3.4.1. Comparación entre los valores arrojados por el Software y las concentraciones máximas permisibles establecidas por la normativa ambiental.**

Una vez conocida la variación de las concentraciones de cada contaminante en función de la distancia, se compararon estos valores con el límite máximo permisible establecido para cada compuesto (Apéndice E), determinando así el nivel de calidad del aire del área evaluada a 600 m.

### 3.5. Análisis del impacto sobre la salud de la población perteneciente a las zonas aledañas a la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui.

En vista de que los síntomas y signos asociados a sustancias contaminantes son comunes en personas expuestas a estos gases, se solicitó ante el Ente Regional del Ministerio de Salud (SALUDANZ) el record actual de enfermedades respiratorias para las comunidades más cercanas a la refinería de Puerto La Cruz (Guanire, Gulf, Guaraguao y Chuparin). Esta entidad también nos proporcionó los resultados de una serie de encuestas realizadas a estos mismos sectores, las cuales se tomaron en cuenta para estudiar el impacto sobre la salud de esta población.

El modelo de encuesta empleado por SALUDANZ, de tipo estructurada no personalizada se muestra en la figura 3.2.



**Figura 2.4.** Muestra de dispersión del Software DISPER: mapa de las concentraciones de Óxidos de Nitrógeno (NOx) generadas por tres chimeneas industriales que emite 1 g/s de NOx bajo un viento de 5 m/s en dirección E y en un terreno con pendiente <sup>[16]</sup>.

**ENCUESTA: Realizada por SALUDANZ**

**Dirigida a:** La población advacente a la Refinería de Puerto La Cruz

**Zona:** \_\_\_\_\_

1) ¿Huele usted los gases de la refinería cerca de su casa?

SI \_\_\_\_\_ NO \_\_\_\_\_

2) ¿A qué hora es más frecuente este olor?

Mañana \_\_\_\_\_ Noche \_\_\_\_\_

Tarde \_\_\_\_\_ A toda hora \_\_\_\_\_

3) ¿Sufre usted de alguna enfermedad respiratoria?

SI \_\_\_\_\_ NO \_\_\_\_\_

Tipo de enfermedad: \_\_\_\_\_

4) ¿Cuáles son las edades que más sufren de estas enfermedades?

Niños \_\_\_\_\_ Cualquier edad \_\_\_\_\_

Tercera edad \_\_\_\_\_

5) ¿Ha sufrido usted algún accidente de fuga masiva de gases provenientes de la refinería de Puerto La Cruz?

SI \_\_\_\_\_ NO \_\_\_\_\_

En qué año \_\_\_\_\_

**Gracias por su colaboración...**

**Figura 3.2.** Modelo de encuesta realizada por SALUDANZ

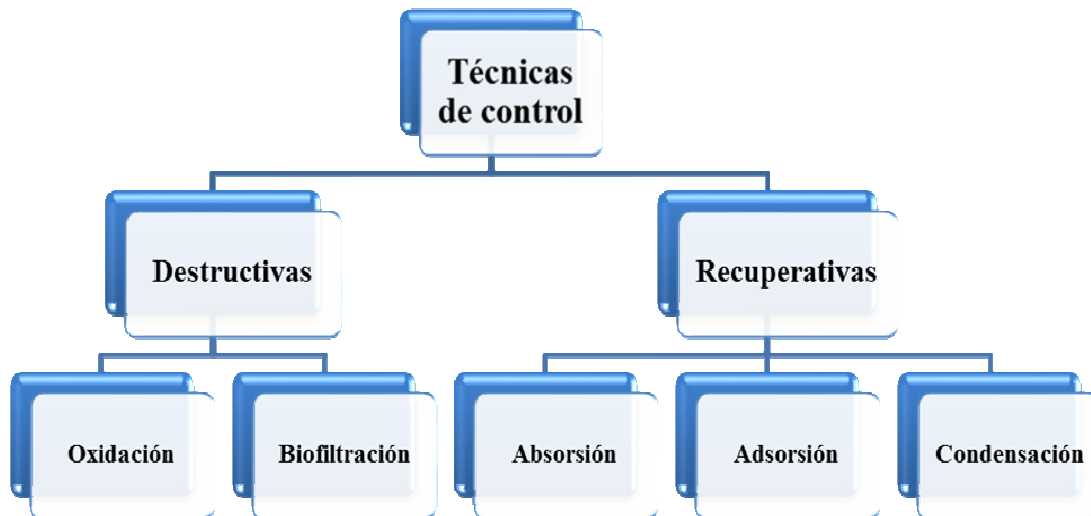


### **3.6. Evaluación de las mejores técnicas de mitigación de las emisiones atmosféricas en la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui.**

Se evaluaron las técnicas existentes en cuanto a reducción de emisiones contaminantes presentes en la atmósfera de forma teórica, ya que en la Refinería no se está aplicando en la actualidad ninguna técnica para la disminución de las emisiones. La evaluación constará de un cotejo sobre las ventajas y desventajas del uso de cada una de las técnicas propuestas en función de los equipos evaluados.

#### **3.6.1. Técnicas de eliminación de contaminantes atmosféricos**

En un concepto más amplio, el término de compuestos o gases contaminantes no sólo incluye miles de especies químicas que son tóxicas para la salud, como algunas de las ya mencionadas, sino también sustancias precursoras de oxidantes fotoquímicos responsables de la contaminación por humo y niebla (smog), que contribuyen al efecto invernadero y/o a la degradación de la capa de ozono atmosférico y por otra parte, se ha demostrado que un gran número de contaminantes atmosféricos son agentes cancerígenos. Las reacciones humanas que aparecen como consecuencia de la exposición prolongada a una mezcla de emisiones contaminantes frecuentemente presentes en el aire son: cansancio, dolor de cabeza, mareos, tos, piel enrojecida, mucosas secas, ojos, nariz y garganta irritados. Existen diferentes tecnologías para el control y eliminación de estos gases contaminantes. En la figura 3.3. se muestra un esquema adaptado de Khan y Ghoshal.



**Figura 3.3.** Esquema de técnicas de eliminación de emisiones atmosféricas. <sup>[17]</sup>

### 3.6.2. Técnicas de control

- Técnicas destructivas:

La oxidación térmica combinada con un sistema de recuperación de calor es una tecnología ampliamente utilizada desde hace varias décadas. Se consigue con ella una destrucción entre el 95 y el 99 por ciento de los contaminantes atmosféricos introducidos. La concentración de la corriente a tratar puede variar entre 100 y 20.000 ppm, y las temperaturas de trabajo van de 700 a 1.000 °C. El tiempo de residencia nominal varía de 0,5 a 1 s. Los compuestos que están presentes en bajas concentraciones, o que son difíciles de oxidar, requieren mayor consumo de combustible y mayor tiempo de residencia en el reactor para asegurar su reducción hasta los niveles exigidos. Por otro lado, se evita la utilización de la combustión térmica cuando la concentración de Orgánicos supera en un 25% ciento el límite

inferior de inflamabilidad. Aparte de los costes energéticos que conlleva la oxidación térmica, otra desventaja importante es la posible generación de contaminación secundaria por óxidos de nitrógeno, debido a las altas temperaturas requeridas, lo que exige un posterior tratamiento. Los sistemas de oxidación catalítica oxidan directamente los gases contaminantes de forma similar a los sistemas de oxidación térmica; la principal diferencia es que aquéllos operan a temperaturas más bajas, entre 350 y 500 °C. Esto es posible debido a la utilización de catalizadores que reducen las necesidades térmicas.

La biofiltración se desarrolló inicialmente para eliminar olores de los gases de desecho, pero actualmente se ha extendido su aplicación a la eliminación de emisiones contaminantes en procesos industriales. Se basa en la capacidad de los microorganismos para convertir, bajo condiciones aeróbicas, los contaminantes orgánicos en dióxido de carbono, agua y biomasa.

La corriente gaseosa ha de ser tratada previamente: humidificada, enfriada y limpiada de material particulado. Esta tecnología es conveniente para volúmenes de más de 300 m<sup>3</sup>/min. y concentraciones menores de 5.000 ppm. La principal ventaja es que no transfiere la contaminación a otro medio, y se caracteriza, además, por el bajo consumo de energía.

La biofiltración depende de la biodegradabilidad de los contaminantes. Algunos compuestos pueden tener estructuras que resisten a las reacciones microbianas: la oxidación podría no ser completa, llegándose incluso a formar subproductos más tóxicos que los compuestos originales. Por ejemplo, durante la transformación aeróbica de tricloroetileno se puede formar como subproducto cloruro de vinilo que es altamente tóxico. [8]

- Técnicas de recuperación:

La condensación consiste en hacer cambiar de estado gaseoso a líquido, mediante el aumento de presión o la disminución de la temperatura del sistema, es muy eficaz para compuestos orgánicos con puntos de ebullición por encima de 38°C y concentraciones relativamente altas (5.000 ppm), es aplicable para COV especialmente. La fuerza impulsora del cambio de fase es la sobresaturación, que se consigue presurizando y/o enfriando la corriente gaseosa contaminada. Para las sustancias con bajo punto de ebullición o presentes en bajas concentraciones estas etapas elevan el costo de operación. En muchas ocasiones se trabaja dentro de los límites de inflamabilidad, de ahí que el gas inerte que haya que utilizar provoque costos adicionales. El producto líquido obtenido debe ser tratado posteriormente para eliminar el agua y separar los distintos compuestos, que son reutilizados, vendidos o quemados. El agua condensada requiere un posterior tratamiento si contiene compuestos orgánicos miscibles.

La absorción separa los gases contaminantes de una corriente gaseosa, poniendo en contacto el aire contaminado con un disolvente líquido (agua, aminas, sosa cáustica, hidrocarburos con alto punto de ebullición). Los gases contaminantes solubles se disuelven en la fase líquida, y así se depura la corriente de aire. El contacto gas-líquido se realiza en torres de relleno en las que se atomiza el líquido. La capacidad de los sistemas diseñados está entre 50 y 3.000 m<sup>3</sup>/min., mientras que la concentración de contaminantes atmosféricos varía entre 500 y 5.000 ppm. Se pueden conseguir eficiencias en la eliminación de estos gases entre 90 y 98 por ciento. En general, esta técnica no se aconseja para operaciones discontinuas por su lenta puesta en marcha, pero sí es interesante para corrientes con alto contenido en humedad, que podría reducir las posibilidades de adsorción de carbones activos y zeolitas.

La adsorción puede ser física (fisisorción) o química (quimisorción) y está basada en la interacción entre adsorbato y adsorbente, que, en general, es un sólido microporoso con poros por debajo de 2 nm.

Adsorción basada en carbón activo. La elección del adsorbente adecuado depende de su aplicación, pero el carbón activo, debido a su alta área específica, es uno de los más utilizados. Es un sistema flexible y barato, tanto en costes de operación como de inmovilizado, capaz de tratar una amplia variedad de contaminantes. Su principal inconveniente es que requiere regeneraciones periódicas, de ahí que se dispongan dos líneas en paralelo para usar en alternancia. La regeneración se hace elevando la temperatura, que no puede ser muy alta debido a que el carbón es inflamable. Por otro lado, si la temperatura es insuficiente no hay desorción, el lecho no se regenera y debe reemplazarse. El carbón activo es un buen adsorbente para altas capacidades y para muchos contaminantes atmosféricos con pesos moleculares entre 40 y 150 y puntos de ebullición entre (35 y 260) °C, e incluso para compuestos halogenados, siempre y cuando la humedad relativa de la corriente a tratar no supere el 60%. [8]

### **3.6.3. Ventajas y desventajas de las técnicas de control estudiadas**

En muchas aplicaciones, las altas temperaturas de descargas de los gases hacen necesario su enfriamiento previo para la condensación o adsorción, mientras que la oxidación térmica o catalítica se benefician de estas temperaturas.

Los adsorbedores permiten una recuperación del producto, no hay problema de residuo, posibilidad de automatizar el proceso y remoción de contaminantes en muy bajas concentraciones; sin embargo la recuperación es sofisticada y costosa, el adsorbente se desgasta, la regeneración del adsorbente requiere vapor o vacío, alto costo de capital y eliminación previa de partículas del gas porque tuye el adsorbente.

Los absorbedores presentan una calidad relativamente baja de presión, alta eficiencia, relativo bajo costo de capital, abarca poco espacio, captan gases y partículas simultáneamente. Unas de las desventajas de estos dispositivos, es que pueden crear un problema de disposición de líquidos, el producto se obtiene húmedo, las partículas pueden tupid el lecho o los platos, altos costos de mantenimiento y problemas de corrosión.

Los condensadores permiten recuperar el producto y rehusar el agua refrigerante en intercambiadores de calor. Si las concentraciones típicas de contaminantes son bajas, la condensación no puede aplicarse de manera efectiva. Así mismo es necesario asegurar la operación fuera del intervalo de inflamabilidad dela mezcla contaminante-aire, es por ello que es una técnica de baja eficiencia en la que el costo de refrigeración puede ser muy alto.

La oxidación térmica ofrece una destrucción entre el 95% y 99% de los contaminantes introducidos; sin embargo los compuestos que están presentes en bajas concentraciones, o que son difíciles de oxidar requieren de mayor consumo de combustible y mayor tempo de residencia en el reactor para asegurar su reducción hasta los niveles exigidos, otros desventaja importante es la posible generación de contaminación secundaria por óxidos de nitrógenos, debido a las altas temperaturas requeridas, lo que exige un posterior tratamiento. <sup>[8]</sup>

## CAPÍTULO IV.

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. Identificación de las principales fuentes de emisiones atmosféricas provenientes de las unidades de procesos de la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui.

Según la información suministrada por la Refinería de Puerto La Cruz, las fuentes fijas correspondientes a las unidades de procesos seleccionadas, se muestran en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1.** Fuentes Fijas de las diferentes Unidades de Procesos. <sup>[18]</sup>

UNIDAD	FUENTE FIJA
Destilación Atmosférica 1 (DA-1)	Horno BA-1
	Horno H-751
Destilación Atmosférica 2 (DA-2)	Horno H-2
	Horno 101-B
Craqueo Catalítico (FCC)	Horno B-51
	Flare
	Regenerador D-1
Servicios Industriales RPLC	Caldera 1
	Caldera 2
	Caldera 3
	Caldera 4
	Turbogenerador N°6
	Turbogenerador N°7
	Turbogenerador N°8

**Tabla 4.1.** Fuentes Fijas de las diferentes Unidades de Procesos. (Continuación). <sup>[18]</sup>

UNIDAD	FUENTE FIJA
Hidroprocesos	Horno B-1901
	Horno B-1902
	Horno B-2001/2002/2033
	Horno B-2004
	Horno B-4501
	Horno B-4503
	Mechurrio Unidad 49D-4952
	Mechurrio Unidad M-7101
Alquilación	Horno H3
	Flare
GLP	Flare

En la tabla 4.1 mostrada anteriormente, se observa que para ambas unidades de Destilación Atmosférica se tienen dos (2) hornos quemadores. Las unidades de Alquilación y Craqueo Catalítico Fluidizado cuentan con un horno y un flare, disponibles en cada unidad y un convertidor adicional en esta última. Las fuentes de emisión para la unidad de Servicios Industriales, están representadas por cuatro (4) calderas y tres (3) turbogeneradores. Del mismo modo, se disponen de seis (6) hornos quemadores y dos (2) mechurrios en la unidad de Hidroprocesos y por último de un flare en la unidad de GLP. En este sentido, se cuentan con un total de veinticuatro (24) fuentes fijas, distribuidas en: doce (12) hornos quemadores, cinco (5) flare, cuatro (4) calderas y tres (3) turbogeneradores.



## 4.2. Cuantificación de las Concentraciones de los Gases Contaminantes (CO, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>).

### 4.2.1. Resultados de las Concentraciones promedios de los Contaminantes Atmosféricos (CO, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>).

En la tabla 4.2 se presentan los promedios simples entre las concentraciones de cada contaminante atmosférico para ambas corridas por cada fuente fija. Es importante señalar que todos estos contaminantes debieron ser estudiados en conjunto para verificar cuál de ellos posee la mayor concentración en las unidades de producción mencionadas.

**Tabla 4.2.** Concentraciones de Gases Contaminantes.

Fuente	Concentración de Gases Contaminantes				
	Corrida	CO (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	H <sub>2</sub> S (mg/m <sup>3</sup> )
<b>Unidad de Destilación Atmosférica 1</b>					
<b>Horno BA-1</b>	1	2	44	31,4	2,8
	2	9	40	41,9	2,8
	<b>Promedio</b>	<b>5,5</b>	<b>42</b>	<b>36,65</b>	<b>2,8</b>
<b>Horno H-751</b>	1	32	77	39,3	2,8
	2	26	75	44,5	2,8
	<b>Promedio</b>	<b>29</b>	<b>76</b>	<b>41,9</b>	<b>2,8</b>
<b>Unidad de Destilación Atmosférica 2</b>					
<b>Horno H-2</b>	1	1	92	2,6	1,4
	2	2	96	2,6	1,4
	<b>Promedio</b>	<b>1,5</b>	<b>99</b>	<b>2,6</b>	<b>1,4</b>
<b>Horno 101-B</b>	1	34	3	2,6	1,4
	2	36	1	2,6	1,4
	<b>Promedio</b>	<b>35,5</b>	<b>2</b>	<b>2,6</b>	<b>1,4</b>

Tabla 4.2. Concentraciones de Gases Contaminantes. (Continuación)

Fuente	Concentración de Gases Contaminantes				
	Corrida	CO (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	H <sub>2</sub> S (mg/m <sup>3</sup> )
<b>Unidad de Craqueo Catalítico (FCC)</b>					
Horno B-51	1	12	36	21	2,8
	2	17	45	31,4	2,8
	Promedio	14,5	40,5	26,2	2,8
Regenerador D-1	1	13,076	9	81,2	2,8
	2	8,256	8	41,9	2,8
	Promedio	10666	8,5	61,55	2,8
Flare	1	--	--	--	--
	2	--	--	--	--
	Promedio	--	--	--	--
	Promedio	8,5	42,5	2,6	1,4
<b>Unidad de Alquilación</b>					
Horno H-3	1	7	43	2,6	1,4
	2	10	42	2,6	1,4
	Promedio	8,5	42,5	2,6	1,4
Flare	1	--	--	--	--
	2	--	--	--	--
	Promedio	--	--	--	--
<b>Unidad de GLP</b>					
Flare	1	--	--	--	--
	2	--	--	--	--
	Promedio	--	--	--	--

Tabla 4.2. Concentraciones de Gases Contaminantes. (Continuación)

Fuente	Concentración de Gases Contaminantes				
	Corrida	CO (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	H <sub>2</sub> S (mg/m <sup>3</sup> )
<b>Servicios Industriales RLPC</b>					
Turbogen. Nº6	1	28	33	2,6	1,4
	2	32	36	2,6	1,4
	<b>Promedio</b>	<b>30</b>	<b>34,5</b>	<b>2,6</b>	<b>1,4</b>
Turbogen. Nº7	1	28	59	2,6	1,4
	2	32	67	2,6	1,4
	<b>Promedio</b>	<b>30</b>	<b>63</b>	<b>2,6</b>	<b>1,4</b>
Turbogen. Nº8	1	6	54	2,6	1,4
	2	7	50	2,6	1,4
	<b>Promedio</b>	<b>6,5</b>	<b>52</b>	<b>2,6</b>	<b>1,4</b>
Caldera 1	1	1	40	2,6	1,4
	2	1	42	2,6	1,4
	<b>Promedio</b>	<b>1</b>	<b>41</b>	<b>2,6</b>	<b>1,4</b>
Caldera 2	1	389	33	2,6	1,4
	2	376	30	2,6	1,4
	<b>Promedio</b>	<b>382,5</b>	<b>31,5</b>	<b>2,6</b>	<b>1,4</b>
Caldera 3	1	9	74	2,6	1,4
	2	7	73	2,6	1,4
	<b>Promedio</b>	<b>8</b>	<b>73,5</b>	<b>2,6</b>	<b>1,4</b>
Caldera 4	1	4	189	2,6	1,4
	2	9	203	2,6	1,4
	<b>Promedio</b>	<b>6,5</b>	<b>196</b>	<b>2,6</b>	<b>1,4</b>

Tabla 4.2. Concentraciones de Gases Contaminantes. (Continuación)

Fuente	Concentración de Gases Contaminantes				
	Corrida	CO (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	H <sub>2</sub> S (mg/m <sup>3</sup> )
<b>Hidroprocesos</b>					
Horno B-1901	1	1	64	2,6	1,4
	2	1	63	2,6	1,4
	<b>Promedio</b>	<b>1</b>	<b>63,5</b>	<b>2,6</b>	<b>1,4</b>
Horno B-1902	1	1	63	2,6	1,4
	2	1	67	2,6	1,4
	<b>Promedio</b>	<b>1</b>	<b>65</b>	<b>2,6</b>	<b>1,4</b>
Horno B-2001/2002/2003	1	1	24	2,6	1,4
	2	1	24	2,6	1,4
	<b>Promedio</b>	<b>1</b>	<b>24</b>	<b>2,6</b>	<b>1,4</b>
Horno B-2004	1	1	65	2,6	1,4
	2	1	64	2,6	1,4
	<b>Promedio</b>	<b>1</b>	<b>64,5</b>	<b>2,6</b>	<b>1,4</b>
Horno B-4501	1	5	76	2,6	1,4
	2	11	76	2,6	1,4
	<b>Promedio</b>	<b>8</b>	<b>76</b>	<b>2,6</b>	<b>1,4</b>
Horno B-4503	1	1	62	2,6	1,4
	2	1	62	2,6	1,4
	<b>Promedio</b>	<b>1</b>	<b>62</b>	<b>2,6</b>	<b>1,4</b>
Mechurrio Unidad 49 D-4952	1	--	--	--	--
	2	--	--	--	--
	<b>Promedio</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>--</b>

**Tabla 4.2. Concentraciones de Gases Contaminantes. (Continuación)**

Fuente	Concentración de Gases Contaminantes				
	Corrida	CO (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	H <sub>2</sub> S (mg/m <sup>3</sup> )
Mechurrio Unidad M-7101	1	--	--	--	--
	2	--	--	--	--
	Promedio	--	--	--	--

En la tabla 4.2 se aprecia que el regenerador D-1 perteneciente a la unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado, presentó el mayor índice de monóxido de carbono (CO), mientras que las fuentes de emisión de la unidad de Hidroprocesos presentaron la menor concentración de CO, siendo ésta 1ppm, a excepción del horno B-4501 que arrojó un valor de 8ppm. El dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) presentó el mayor índice en la caldera 4 de la unidad de Servicios Industriales. Para las unidades de Destilación Atmosférica 2, Servicios Industriales e Hidroprocesos, el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) mostró la misma concentración (2,6 mg/m<sup>3</sup>), sin embargo, la mayor concentración de este contaminante se obtuvo en el regenerador D-1 de la unidad de Craqueo Catalítico (FCC), con un valor de 61,55 mg/m<sup>3</sup>.

Para la unidad de Destilación Atmosférica 1 y Craqueo Catalítico Fluidizado, la concentración de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) resultó ser la misma con un valor de 2,8 mg/m<sup>3</sup>. Del mismo modo, las unidades de Destilación Atmosférica 2, Alquilación, Servicios Industriales e Hidroprocesos, presentan el mismo índice de H<sub>2</sub>S (1,4 mg/m<sup>3</sup>). Finalmente, se pudo notar que la mayor concentración de los gases contaminantes la representa el monóxido de carbono (CO) con un índice significativamente alto de 10666 ppm, proveniente del regenerador D-1 perteneciente a la unidad de Craqueo Catalítico (FCC). Esto es alarmante, en vista que a concentraciones de CO mayores de 50 ppm durante un tiempo de exposición de 8 horas, produce modificaciones en la hemoglobina de la sangre desplazando el

oxígeno en la hemoglobina, transformándose en carboxihemoglobina (COHb) y reduciendo entonces su capacidad de acarreo de oxígeno. Todo ello trae como consecuencia efectos negativos sobre la salud que van desde la reducción de destrezas y modificación de la percepción visual, hasta cambios en las funciones cardiacas y pulmonares pudiendo llegar hasta la muerte.

Es importante señalar que el cálculo de las concentraciones promedio para los flare o mechurrios, no se pudo efectuar en vista de que la Refinería no reportó en su informe valores de concentraciones de contaminantes atmosféricos para estas fuentes fijas.

#### **4.3. Investigación de las emisiones fugitivas (COV, CH<sub>4</sub> y C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) provenientes de los accesorios y equipos principales de las unidades de procesos, según lo establecido en la norma EPA (2003).**

##### **4.3.1. Resultados de las emisiones fugitivas (COV, CH<sub>4</sub> y C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) en las principales fuentes fijas**

Los resultados de estas emisiones se muestran en las siguientes tablas y diagramas de porcentajes:

#### 4.3.1.1. Unidad de Destilación Atmosférica 1 (DA-1). Fluido liviano

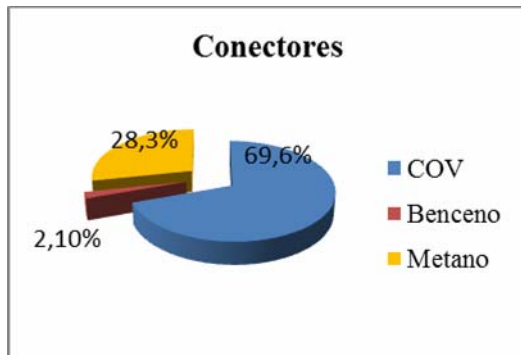
**Tabla 4.3.** Concentraciones de emisiones fugitivas de la unidad Destilación Atmosférica 1.

	Componente	ECOV (ton/año)	EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (ton/año)	FECH <sub>4</sub> (lb/hr)	ECH <sub>4</sub> (ton/año)
<b>Horno BA-1</b>	Conectores	0.32	0.0096	3.22E-02	0.13
	Válvulas	2.673	0.080	0.27	1.074
	Líneas de salida	0.061	0.002	2.35E-03	0.01
<b>Horno H-751</b>	Conectores	0.32	0.0096	3.22E-02	0.13
	Válvulas	2.673	0.080	0.27	1.074
	Líneas de salida	0.061	0.002	2.35E-03	0.01
	Σ Totales (ton/año)	6.108	0.032		2.428
	Σ Totales (ton/mes)	0.509	2.67E-03		0.205

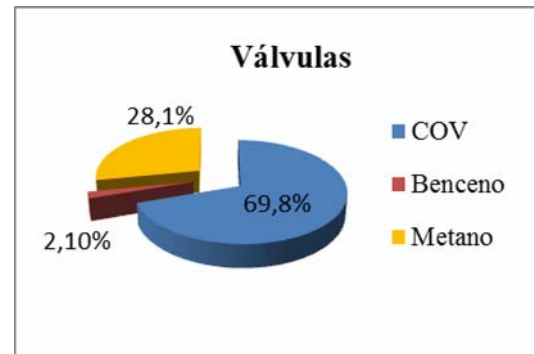
#### *Porcentaje total de emisiones fugitivas (COV, CH<sub>4</sub> y C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)*

**Tabla 4.4.** Porcentaje total de emisiones fugitivas entre ambas fuentes fijas

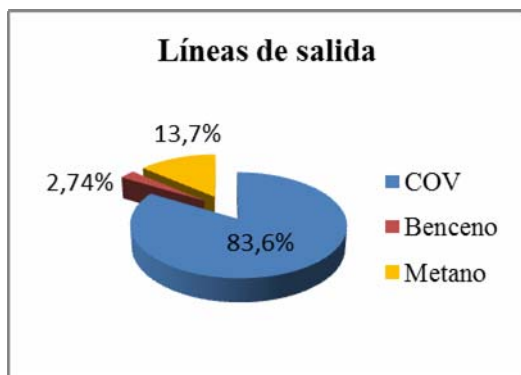
Horno BA-1 y Horno H-751	Componente	ECOV (ton/año)	%ECOV	EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (ton/año)	%EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	ECH <sub>4</sub>	%ECH <sub>4</sub> (ton/año)
	Conectores	0,64	69,6	0,02	2,1	0,26	28,3
	Válvulas	5,35	69,8	2,1	2,1	2,15	28,1
	Líneas de salida	0,22	83,6	0,004	2,74	0,02	13,7



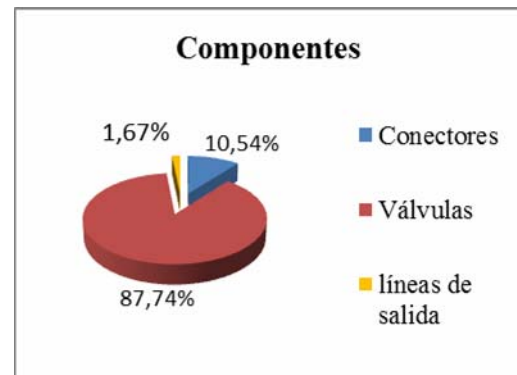
**Figura 4.1.** Emisiones fugitivas en conectores



**Figura 4.2.** Emisiones fugitivas en válvulas.



**Figura 4.3.** Emisiones fugitivas en líneas de salida.



**Figura 4.4.** Emisiones fugitivas por componente.

Se puede apreciar en la tabla 4.3 que para los tres (3) accesorios, el mayor porcentaje de emisión, está representado por los COV, seguido del CH<sub>4</sub> y el menor porcentaje corresponde al C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>. De estos accesorios, la válvula constituye el componente que emite el mayor índice de emisiones fugitivas con un porcentaje de 87.74%, en segundo lugar se tienen los conectores y por último, con un porcentaje de 1.67% en las líneas de salida, esto era de esperarse, ya que las válvulas constituyen el componente con mayor factor de emisión de acuerdo a la norma EPA (2003).



#### 4.3.1.2. Unidad de Destilación Atmosférica 2 (DA-2). Fluido pesado

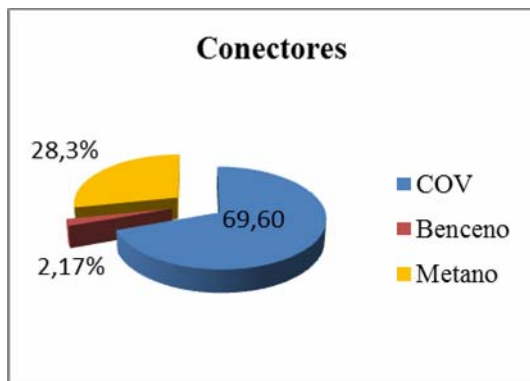
**Tabla 4.5.** Concentraciones de emisiones fugitivas de la unidad Destilación Atmosférica 2.

	Componente	ECOV (ton/año)	EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (ton/año)	FECH <sub>4</sub> (lb/hr)	ECH <sub>4</sub> (ton/año)
<b>Horno H-2</b>	Conectores	0.32	0.0096	3.22E-02	0.13
	Válvulas	0.057	0.002	5.72E-03	0.023
	Líneas de salida	0.061	0.002	2.35E-03	0.01
<b>Horno 101-B</b>	Conectores	0.32	0.0096	3.22E-02	0.13
	Válvulas	0.057	0.002	5.72E-03	0.023
	Líneas de salida	0.061	0.002	2.35E-03	0.01
	Σ Totales (ton/año)	0.88	0.03		0.33
	Σ Totales (ton/mes)	7.33E-02	0.025		0.03

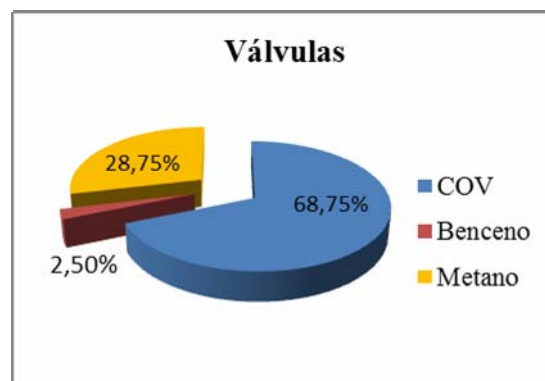
*Porcentaje total de emisiones fugitivas (COV, CH<sub>4</sub> y C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)*

**Tabla 4.6.** Porcentaje total de emisiones fugitivas entre ambas fuentes fijas

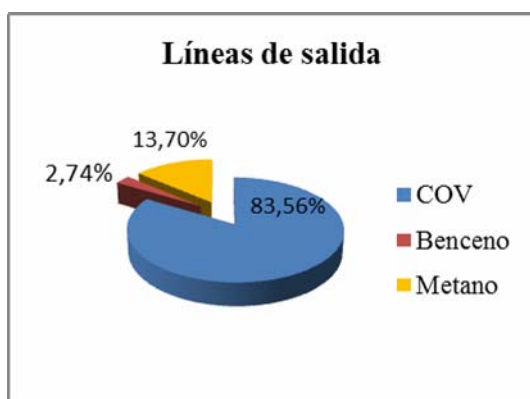
Horn o H-2 Y Horn o 101-B	Componente	ECOV (ton/año)	%ECOV	EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (ton/año)	%EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	ECH <sub>4</sub>	%ECH <sub>4</sub> (ton/año)
<b>Horn o 101-B</b>	Conectores	0,64	69,6	0,02	2,17	0,26	28,3
	Válvulas	0,11	68,75	0,004	2,5	0,046	28,75
	Líneas de salida	0,122	83,56	0,004	2,74	0,02	13,7



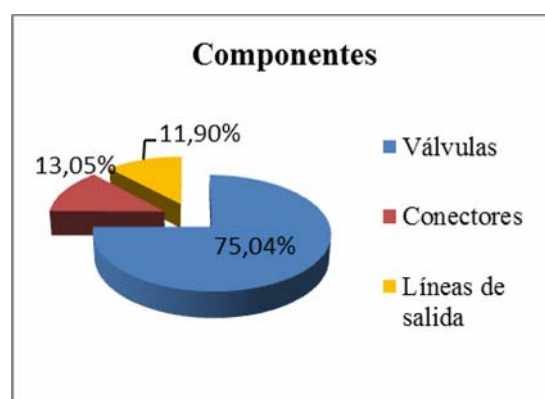
**Figura 4.5.** Emisiones fugitivas en conectores



**Figura 4.6.** Emisiones fugitivas en válvulas.



**Figura 4.7.** Emisiones fugitivas en líneas salida



**Figura 4.8.** Emisiones fugitivas por componente

Se observa en la tabla 4.5, que en todos los accesorios analizados, los COV presentaron el mayor porcentaje de emisión, mientras que el  $C_6H_6$  arrojó el menor porcentaje. Entre ambos hornos, el accesorio que mostró el mayor índice de emisiones fugitivas fueron los conectores con un porcentaje aproximado de 75%, seguido de las válvulas (13.05%) y 12% en las líneas de salida.

Y analizando estas emisiones por componentes, las válvulas tuvieron un mayor porcentaje de emisión con respecto a los demás componentes, en vista de que el factor de emisión en las válvulas es mayor.

#### 4.3.1.3. Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC). Fluido liviano

**Tabla 4.7.** Concentraciones de emisiones fugitivas de la unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado.

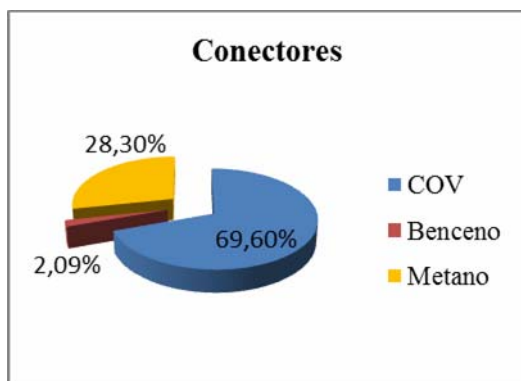
	Componente	ECOV (ton/año)	EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (ton/año)	FECH <sub>4</sub> (lb/hr)	ECH <sub>4</sub> (ton/año)
<b>Horno B-51</b>	Conectores	0.32	0.0096	3.22E-02	0.13
	Válvulas	2.673	0.080	0.27	1.074
	Líneas de salida	0.061	0.002	2.35E-03	0.01
<b>Flare</b>	Conectores	0.25	0.0075	2.5E-02	0.1
	Válvulas	3.341	0.01	0.34	1.35
	Líneas de salida	0.101	0.003	3.91E-03	0.02
	Σ Totales (ton/año)	6.75	0.202		2.684
	Σ Totales (ton/mes)	0.563	1.68E-02		0.224

#### *Porcentaje total de emisiones fugitivas (COV, CH<sub>4</sub> y C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)*

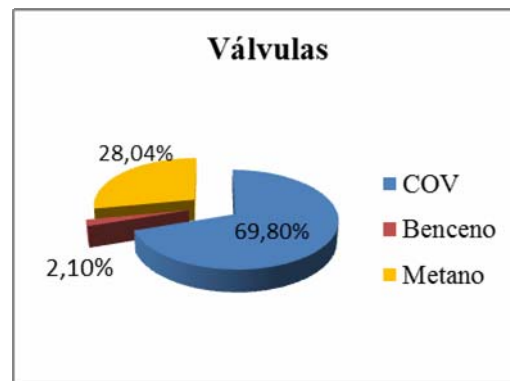
**Tabla 4.8.** Porcentaje total de emisiones fugitivas entre ambas fuentes fijas

	Componente	ECOV (ton/año)	%ECOV	EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (ton/año)	%EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	ECH <sub>4</sub>	%ECH <sub>4</sub> (ton/año)
<b>Horno B-51</b>	Conectores	0,32	69,6	0,0096	2,09	0,13	28,3
	Válvulas	2,673	69,8	0,080	2,1	1,074	28,04
	Líneas de salida	0,061	83,6	0,002	2,74	0,01	13,7
<b>Flare</b>	Componente	ECOV (ton/año)	%ECOV	EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (ton/año)	%EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	ECH <sub>4</sub>	%ECH <sub>4</sub> (ton/año)
	Conectores	0,25	69,44	0,075	2,1	0,1	27,8
	Válvulas	3,341	69,75	0,1	2,09	1,35	28,18
	Líneas de salida	0,101	81,45	0,003	2,42	0,02	16,13

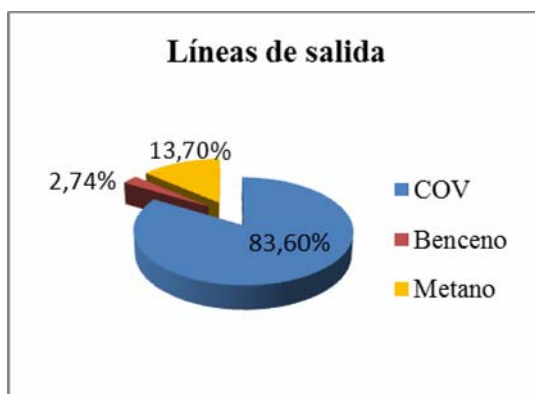
### Horno B-51



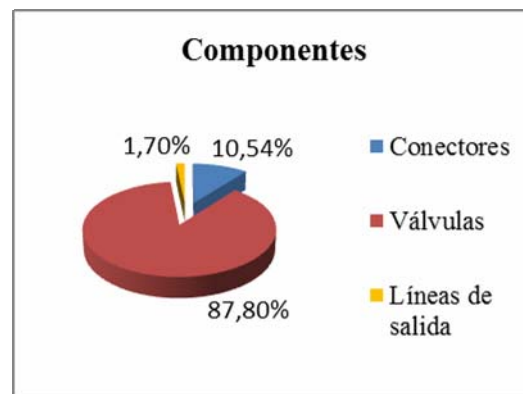
**Figura 4.9.** Emisiones fugitivas en conectores



**Figura 4.10.** Emisiones fugitivas en válvulas.

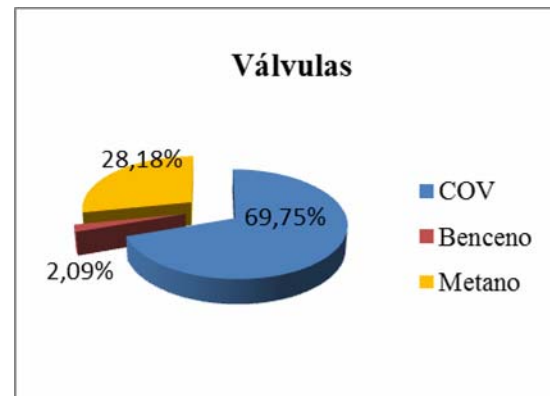
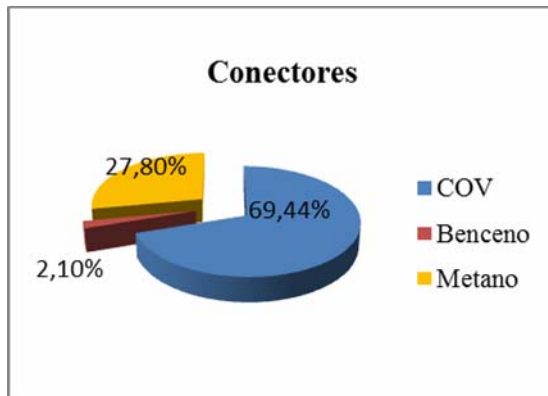


**Figura 4.11.** Emisiones fugitivas en líneas de salida



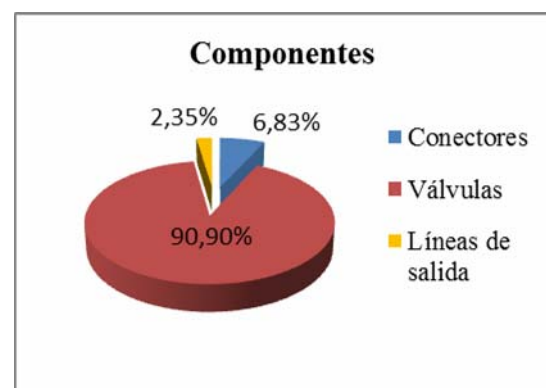
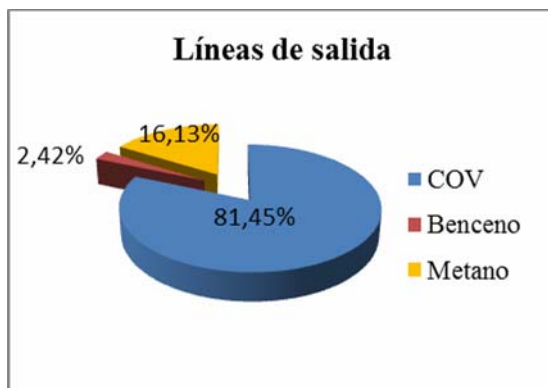
**Figura 4.12.** Emisiones fugitivas por componente.

## Flare



**Figura 4.13 Emisiones fugitivas en conectores.**

**Figura 4.14 Emisiones fugitivas en válvulas.**



**Figura 4.15 Emisiones fugitivas en líneas de salida.**

**Figura 4.16 Emisiones fugitivas por componente.**

Es de notar en la tabla 4.7 que tanto para el horno como en el flare, se obtuvo un mayor porcentaje de COV y un menor índice de benceno, en los diferentes tipos de accesorios. Las válvulas y las líneas de salida del flare mostraron un mayor porcentaje de emisión en comparación con el horno B-51. Este resultado se esperaba, ya que los flares están compuestos por un mayor número de válvulas.

#### 4.3.1.4. Alquiler. Fluido liviano

**Tabla 4.9.** Concentraciones de emisiones fugitivas de la unidad de Alquiler.

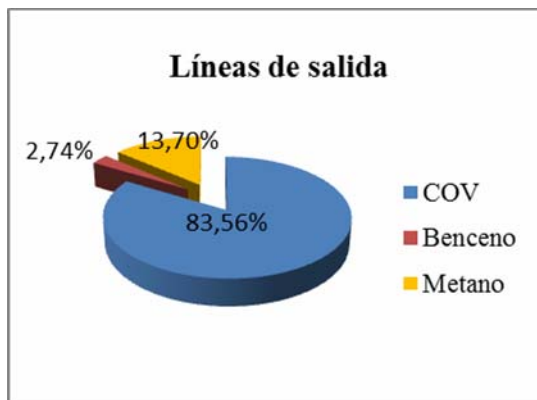
	Componente	ECOV (ton/año)	EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (ton/año)	FECH <sub>4</sub> (lb/hr)	ECH <sub>4</sub> (ton/año)
<b>Horno H-3</b>	Conectores	0.32	0.0096	3.22E-02	0.13
	Válvulas	2.673	0.080	0.27	1.074
	Líneas de salida	0.061	0.002	2.35E-03	0.01
<b>Flare</b>	Conectores	0.25	0.0075	2.5E-02	0.1
	Válvulas	3.341	0.01	0.34	1.35
	Líneas de salida	0.101	0.003	3.91E-03	0.02
	Σ Totales (ton/año)	6.75	0.202		2.684
	Σ Totales (ton/mes)	0.6	1.68E-02		0.224

#### *Porcentaje total de emisiones fugitivas (COV, CH<sub>4</sub> y C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)*

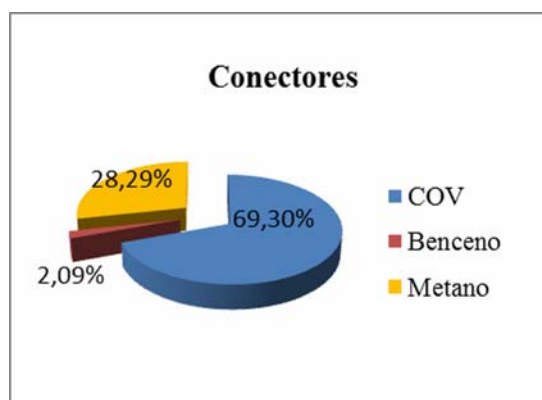
**Tabla 4.10.** Porcentaje total de emisiones fugitivas entre ambas fuentes fijas

	Componente	ECOV (ton/año)	%ECOV	EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (ton/año)	%EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	ECH <sub>4</sub>	%ECH <sub>4</sub> (ton/año)
<b>Horno H3</b>	Conectores	0,32	69,30	0,0096	2,09	0,13	28,29
	Válvulas	2,673	69,85	0,080	2,09	1,074	28,06
	Líneas de salida	0,061	83,56	0,002	2,74	0,01	13,7
<b>Flare</b>	Conectores	0,25	69,93	0,0075	2,10	0,1	27,97
	Válvulas	3,341	69,73	0,1	2,09	1,35	28,18
	Líneas de salida	0,101	81,45	0,003	2,42	0,02	16,13

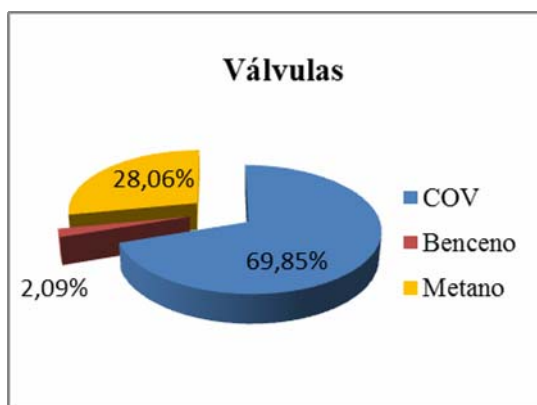
### Horno H-3



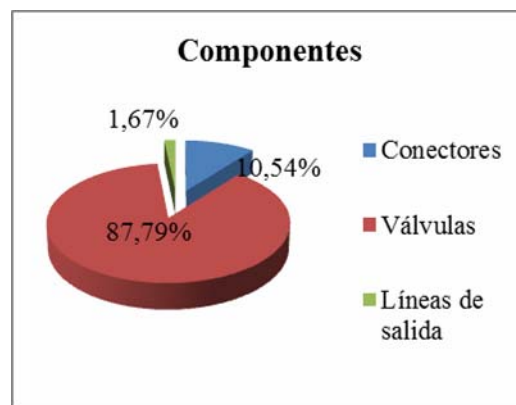
**Figura 4.17 Emisiones fugitivas en líneas fugitivas en**  
de  
conectores.



**Figura 4.18 Emisiones**  
salida.

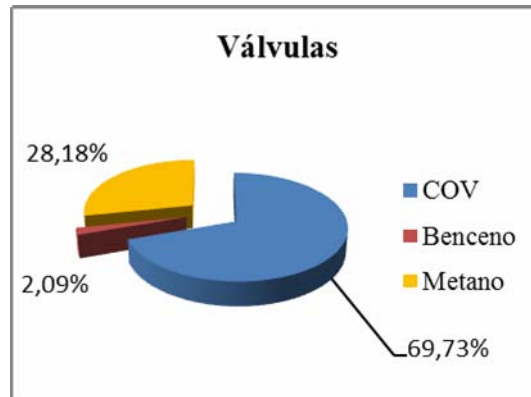
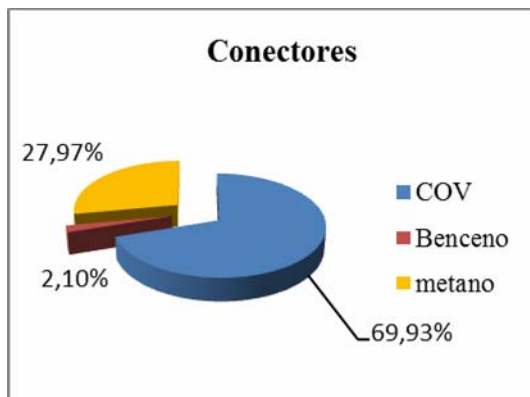


**Figura 4.19 Emisiones fugitivas en válvulas fugitivas por**

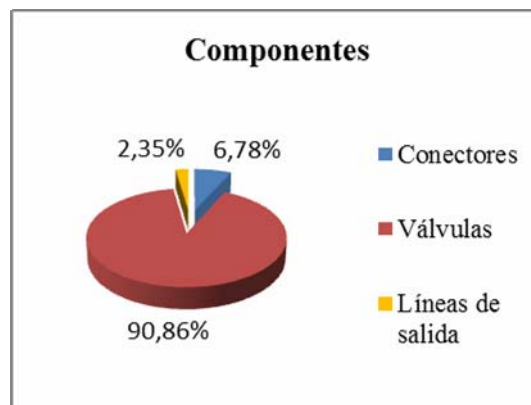
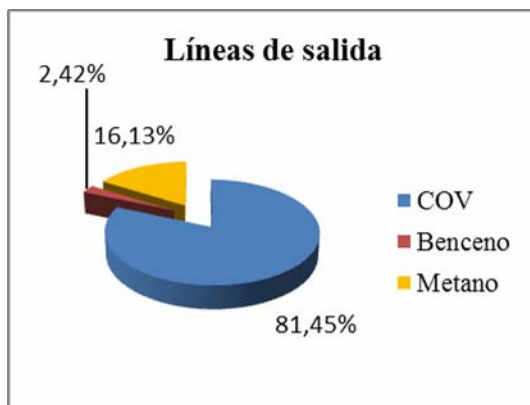


**Figura 4.20 Emisiones**  
componente

Flare



**Figura 4.21 Emisiones fugitivas en conectores.** **Figura 4.22 Emisiones fugitivas en válvulas.**



**Figura 4.23 Emisiones fugitivas en líneas de salida.**

**Figura 4.24 Emisiones fugitivas en Válvulas.**

Como se puede observar en la tabla 4.9, el índice de COV es predominante tanto en el horno como en el flare de la unidad de Alquilación, seguido del metano y en menor proporción el benceno. De los tres (3) tipos de componentes que integran los hornos y flare, las válvulas se encuentran en mayor porcentaje de emisiones por fugas con un valor aproximado de 91%, en segundo lugar los conectores (6,78%) y por último las líneas de salida con un porcentaje de 2,35%. El mayor porcentaje de emisión se obtuvo en las válvulas, en vista que este componente posee un sello de mayor tamaño por donde pueden escapar estas emisiones, así como también presentan el mayor factor de emisión, según lo establecido en la norma EPA (2003).



#### 4.3.1.5. Unidad de Hidroprocesos. Fluido liviano

**Tabla 4.11.** Concentraciones de emisiones fugitivas de la unidad de Hidroprocesos.

	<b>Componente</b>	<b>ECOV (ton/año)</b>	<b>EC<sub>6</sub>H<sub>6</sub> (ton/año)</b>	<b>FECH<sub>4</sub> (lb/hr)</b>	<b>ECH<sub>4</sub> (ton/año)</b>
<b>Horno B-1901</b>	Conectores	0.32	0.0096	3.22E-02	0.13
	Válvulas	2.673	0.080	0.27	1.074
	Líneas de salida	0.061	0.002	2.35E-03	0.01
<b>Horno B-1902</b>	Conectores	0.32	0.0096	3.22E-02	0.13
	Válvulas	2.673	0.080	0.27	1.074
	Líneas de salida	0.32	0.002	2.35E-03	0.01
<b>Horno B- 2001/2002/ 2003</b>	Conectores	0.32	0.0096	3.22E-02	0.13
	Válvulas	2.673	0.080	0.27	1.074
	Líneas de salida	0.32	0.002	2.35E-03	0.01
<b>Horno B-2004</b>	Conectores	0.32	0.0096	3.22E-02	0.13
	Válvulas	2.673	0.080	0.27	1.074
	Líneas de salida	0.32	0.002	2.35E-03	0.01
<b>Horno B-4501</b>	Conectores	0.32	0.0096	3.22E-02	0.13
	Válvulas	2.673	0.080	0.27	1.074
	Líneas de salida	0.32	0.002	2.35E-03	0.01

*Porcentaje total de emisiones fugitivas (COV, CH<sub>4</sub> y C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)*

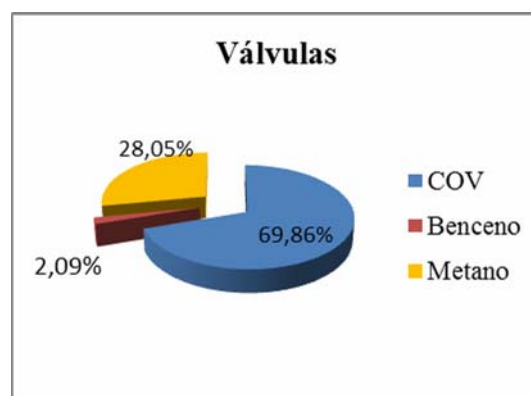
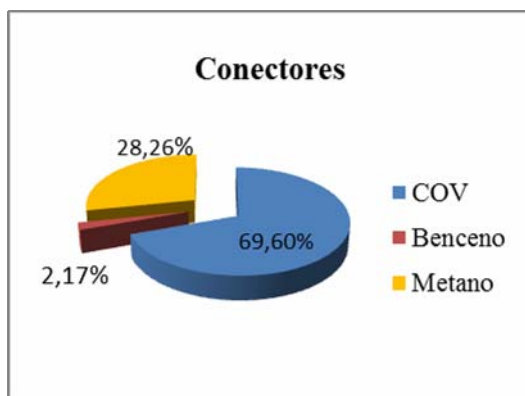
**Tabla 4.12. Porcentaje total de emisiones fugitivas entre hornos y flares**

Horno H3	Componente	ECOV (ton/año)	%ECOV	EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (ton/año)	%EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	ECH <sub>4</sub>	%ECH <sub>4</sub> (ton/año)
	Conectores	1,92	69,6	0,06	2,17	0,78	28,26
Válvulas	16,04	69,86	0,48	2,09	6,44	28,05	
Líneas de salida	0,366	83,56	0,012	2,74	0,06	13,70	

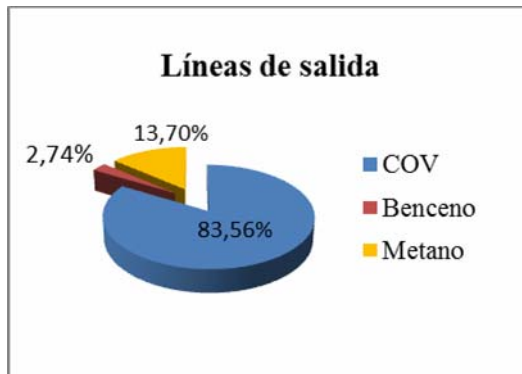
  

Flare	Componente	ECOV (ton/año)	%ECOV	EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (ton/año)	%EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	ECH <sub>4</sub>	%ECH <sub>4</sub> (ton/año)
	Conectores	0,5	69,93	0,015	2,1	0,2	28
Válvulas	6,68	69,73	0,2	2,09	2,7	28,18	
Líneas de salida	0,20	81,3	0,006	2,44	0,04	16,26	

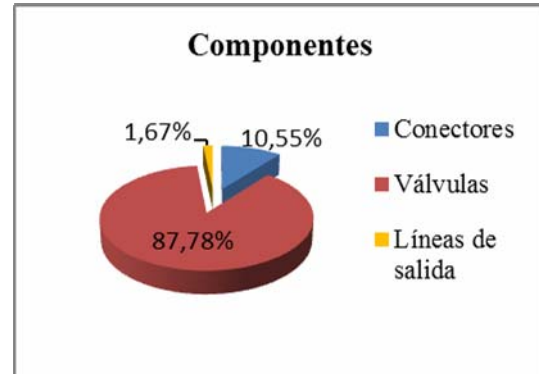
**Hornos**



**Figura 4.25 Emisiones fugitivas en conectores. Figura 4.26 Emisiones fugitivas en válvulas.**

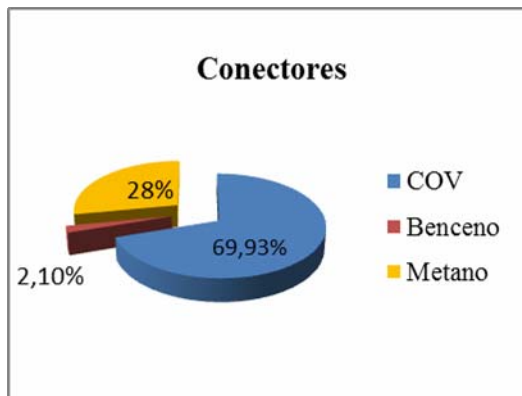


**Figura 4.27 Emisiones fugitivas en líneas de salida.**

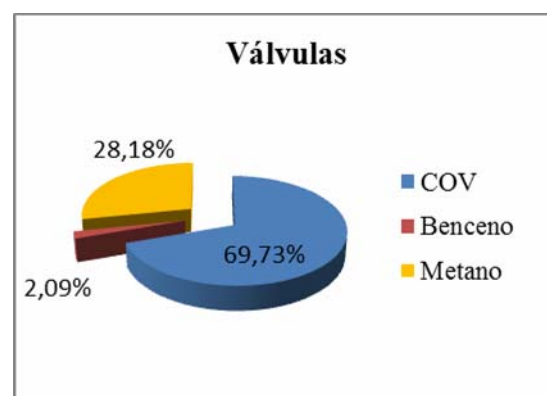


**Figura 4.28 Emisiones fugitivas por componente.**

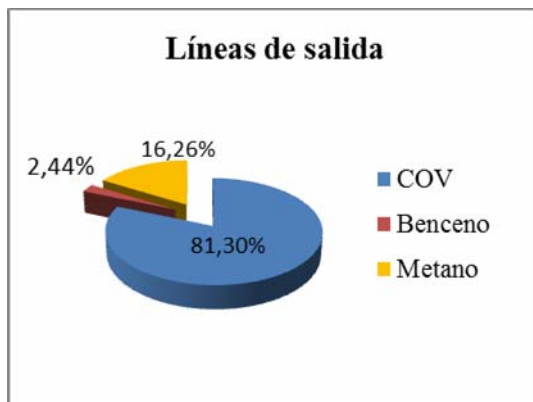
### Flares



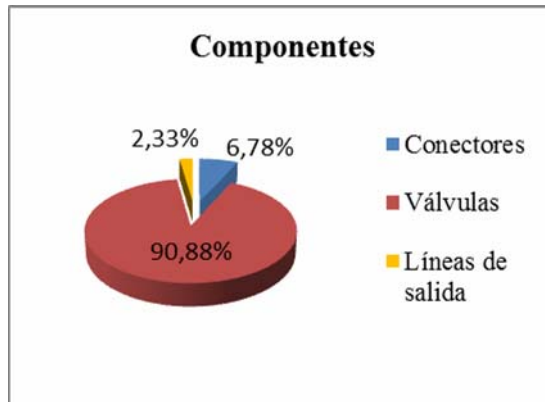
**Figura 4.29 Emisiones fugitivas en conectores.**



**Figura 4.30 Emisiones fugitivas en válvulas.**



**Figura 4.31 Emisiones fugitivas en líneas de salida.**



**Figura 4.32 Emisiones fugitivas por componente.**

En la tabla 4.11 se observa que en dicha unidad ambas fuentes de emisión (hornos y mechurrios) mostraron un mayor índice de emisión de COV en los diferentes accesorios, seguido del CH<sub>4</sub> y por último el C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>. Las válvulas pertenecientes a los mechurrios arrojaron un mayor porcentaje de emisión fugitivas con respecto a los hornos, siendo estos valores 90.88% y 87.78% respectivamente, en segundo lugar se tienen los conectores un porcentaje de emisión de 6.78% en los mechurrios y 10.55% en los hornos. Finalmente, las líneas de salida presentaron un índice de emisión de 2.33% en los mechurrios y 1.67% en los hornos.

#### 4.3.1.6. Unidad de GLP. Fluido liviano

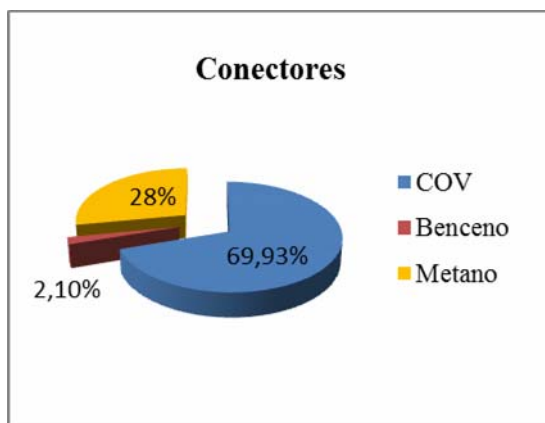
**Tabla 4.13.** Concentraciones de emisiones fugitivas de la unidad de GLP.

	Componente	ECOV (ton/año)	EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (ton/año)	FECH <sub>4</sub> (lb/hr)	ECH <sub>4</sub> (ton/año)
<b>Flare</b>	Conectores	0.25	0.0075	2.5E-02	0.1
	Válvulas	3.341	0.01	0.34	1.35
	Líneas de salida	0.101	0.003	3.91E-03	0.02

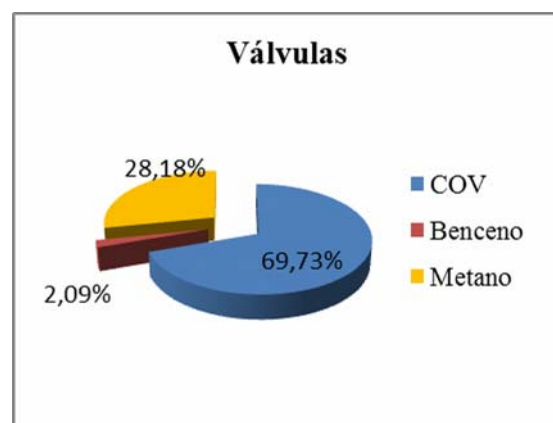
*Porcentaje total de emisiones fugitivas (COV, CH<sub>4</sub> y C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)*

**Tabla 4.14.** Porcentaje total de emisiones fugitivas del flare.

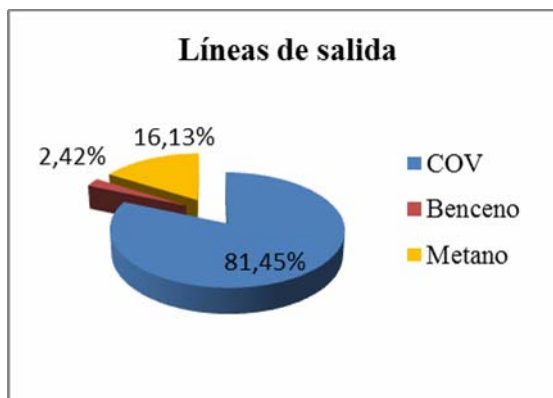
Flare	Componente	ECOV (ton/año)	%ECOV	EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (ton/año)	%EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	ECH <sub>4</sub>	%ECH <sub>4</sub> (ton/año)
	Conectores	0,25	69,93	0,0075	2,1	0,1	28
Válvulas	3,341	69,73	0,1	2,09	1,35	28,18	
Líneas de salida	0,101	81,45	0,003	2,42	0,02	16,13	



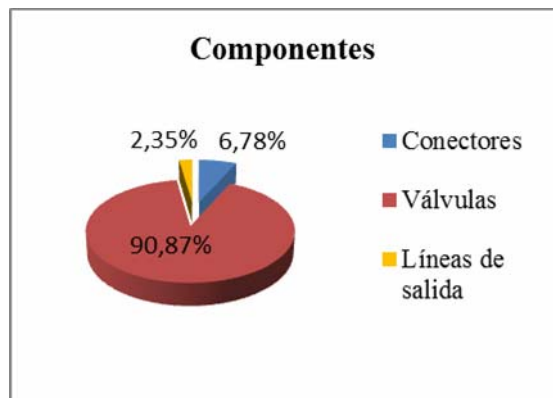
**Figura 4.33** Emisiones fugitivas en conectores.



**Figura 4.34** Emisiones fugitivas en válvulas.



**Figura 4.35** Emisiones fugitivas en líneas de salida.



**Figura 4.36** Emisiones fugitivas por componente.

Se muestra en la tabla 4.13 que en la unidad GLP, la fuente fija (Flare) presentó un mayor índice de COV con respecto al CH<sub>4</sub> y el C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> el que arrojó el menor índice de emisión en los diversos accesorios. El porcentaje de emisiones fugitivas resultó ser mayor en las válvulas con un valor de 90.87%, en segundo lugar 6.78% en los conectores y en las líneas de salida un porcentaje de 2.35%. Este porcentaje arrojado en las válvulas, era de esperarse, en vista de que éstas presentan el mayor factor de emisión.

#### 4.3.1.7. Servicios Industriales (RPLC). Fluido liviano

**Tabla 4.15.** Concentraciones de emisiones fugitivas de la unidad de Servicios Industriales.

	Componente	ECOV (ton/año)	EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (ton/año )	FECH <sub>4</sub> (lb/hr)	ECH <sub>4</sub> (ton/año )
<b>Caldera 1</b>	Conectores	0.32	0.0096	3.22E-02	0.13
	Válvulas	2.673	0.080	0.27	1.074
	Líneas de salida	0.061	0.002	2.35E-03	0.01
<b>Caldera 2</b>	Conectores	0.32	0.0096	3.22E-02	0.13
	Válvulas	2.673	0.080	0.27	1.074
	Líneas de salida	0.061	0.002	2.35E-03	0.01
<b>Caldera 3</b>	Conectores	0.32	0.0096	3.22E-02	0.13
	Válvulas	2.673	0.080	0.27	1.074
	Líneas de salida	0.061	0.002	2.35E-03	0.01

**Tabla 4.15.** Concentraciones de emisiones fugitivas de la unidad de Servicios Industriales. (Continuación).

	Componente	ECOV (ton/año)	EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (ton/año)	FECH <sub>4</sub> (lb/hr)	ECH <sub>4</sub> (ton/año)
<b>Caldera 4</b>	Conectores	0.32	0.0096	3.22E-02	0.13
	Válvulas	2.673	0.080	0.27	1.074
	Líneas de salida	0.061	0.002	2.35E-03	0.01
<b>Turbogenerador N°6</b>	Conectores	0.36	0.012	3.6E-02	0.143
	Válvulas	3.25	0.1	0.33	1.31
	Líneas de salida	0.041	0.001	1.565E-03	0.006
<b>Turbogenerador N°7</b>	Conectores	0.36	0.012	3.6E-02	0.143
	Válvulas	3.25	0.1	0.33	1.31
	Líneas de salida	0.041	0.001	1.565E-03	0.006
<b>Turbogenerador N°8</b>	Conectores	0.36	0.012	3.6E-02	0.143
	Válvulas	3.25	0.1	0.33	1.31
	Líneas de salida	0.041	0.001	1.565E-03	0.006
	Σ Emisiones Totales(ton/año)	23.17	0.59		7.77
	Σ E totales (ton/mes)	1.93	4.92E-02		0.65

*Porcentaje total de emisiones fugitivas (COV, CH<sub>4</sub> y C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)*

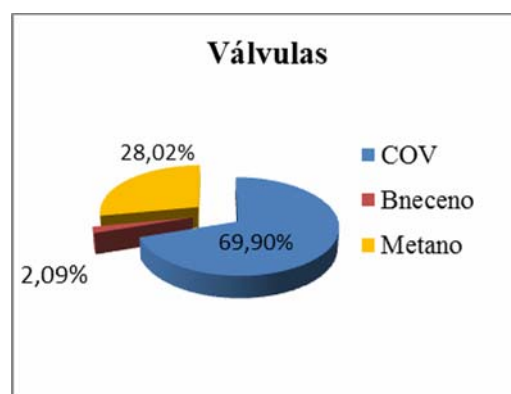
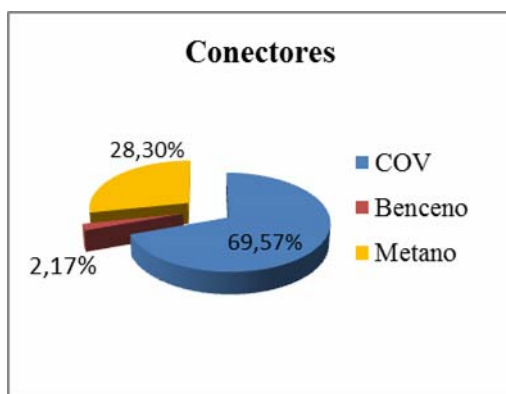
**Tabla 4.16.** Porcentaje total de emisiones fugitivas entre calderas y turbogeneradores

Calderas	Componente	ECOV (ton/año)	%ECO V	EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (ton/año)	%EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	ECH <sub>4</sub>	%ECH <sub>4</sub> (ton/año)
	Conectores	1,28	69,57	0,04	2,17	0,52	28,3
	Válvulas	10,7	69,9	0,32	2,09	4,29	28,02
	Líneas de salida	0,244	83,6	0,008	2,74	0,04	13,7

**Tabla 4.16.** Porcentaje total de emisiones fugitivas entre calderas y turbogeneradores.  
(Continuación).

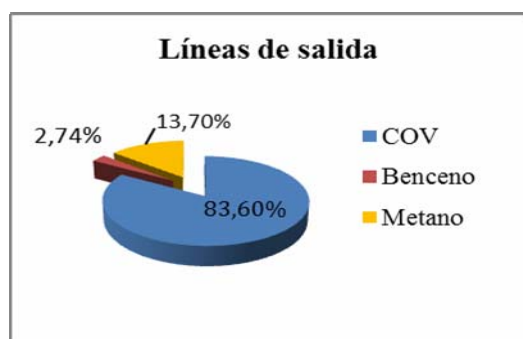
Turbogenerador	Componente	ECOV (ton/año)	%ECOV	EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (ton/año)	%EC <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	ECH <sub>4</sub>	%ECH <sub>4</sub> (ton/año)
	Conectores	1,08	69,7	0,04	2,58	0,43	27,74
	Válvulas	9,75	69,74	0,3	2,15	3,93	28,11
	Líneas de salida	0,12	83,92	0,003	2,1	0,02	13,99

### Calderas

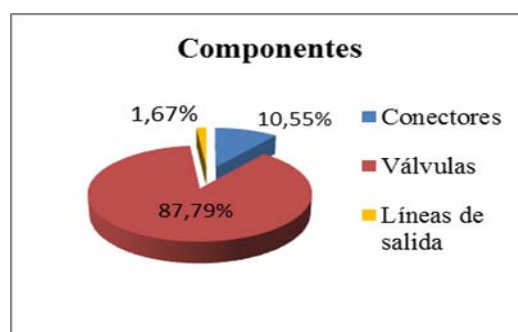


**Figura 4.37** Emisiones fugitivas en conectores.

**Figura 4.38** Emisiones fugitivas en válvulas.



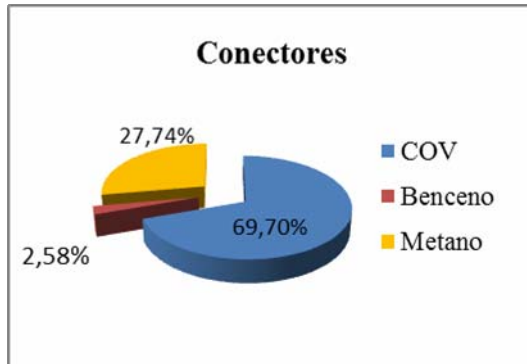
**Figura 4.39** Emisiones fugitivas en líneas de salida.



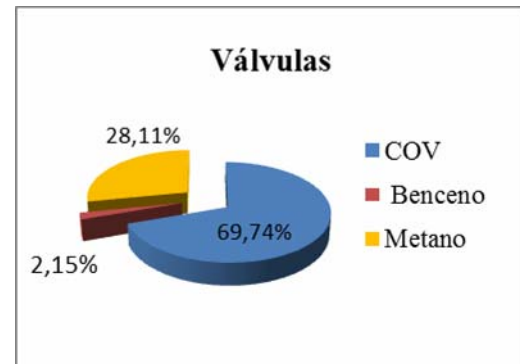
**Figura 4.40** Emisiones fugitivas por componente.



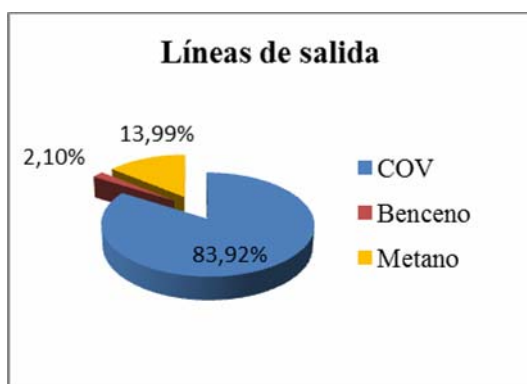
## Turbogeneradores



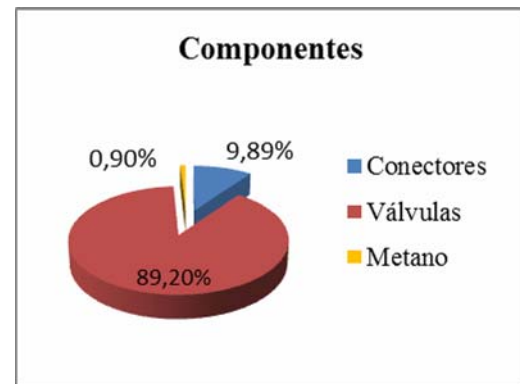
**Figura 4.41 Emisiones fugitivas en conectores.**



**Figura 4.42 Emisiones fugitivas en válvulas.**



**Figura 4.43 Emisiones fugitivas en líneas de salida.**



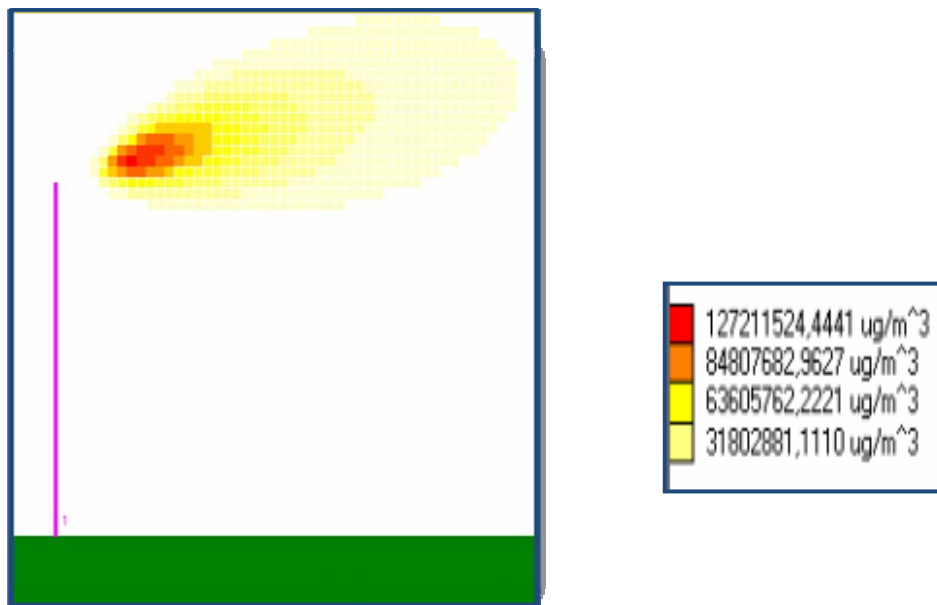
**Figura 4.44 Emisiones fugitivas por componente.**

Se puede apreciar que las emisiones de COV resultaron ser mayor en cada tipo de accesorio, tanto para las calderas como en los turbogeneradores y el menor índice de emisión lo presentó el  $C_6H_6$  en ambas fuentes fijas. Con respecto a los accesorios las emisiones fugitivas fueron mayor en las válvulas de los turbogeneradores en comparación a las calderas, con un valor de 89.20%. Por otro lado, los conectores pertenecientes a las calderas mostraron un valor de 10.55% y 9.89% en los turbogeneradores, seguidamente se tiene que en las líneas de salida se obtuvo un porcentaje de emisión de 0.91%, siendo este menor con respecto a las calderas cuyo

valor fue 1.67%. Resultados los cuales eran de esperarse, ya que el factor de emisión es mayor en las válvulas, según lo establecido en la norma EPA (2003).

#### 4.4. Modelado del comportamiento de los gases contaminantes emanados durante la combustión, a través del software DISPERS 4.0

En la figura 4.45 se puede apreciar como la concentración del contaminante CO se dispersa a una distancia de 600 m desde la fuente emisora (Regenerador D-1), perteneciente a la unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado, en donde a medida que el color es menos pronunciado indica que la concentración del contaminante es menor. Este contaminante arrojó el valor más crítico con respecto al límite máximo permisible, establecido por la normativa ambiental (Decreto 638).



**Figura 4.45.** Dispersión de CO a una distancia de 600 m para el regenerador D-1

Se muestra en la tabla 4.17 los resultados de las concentraciones de los gases evaluados a una distancia de 600 m.

**Tabla 4.17.** Resultados arrojados por el Software DISPER 4.0.

<b>Unidad de Destilación Atmosférica 1 (DA-1)</b>				
	<b>CO (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>NO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>SO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>X (m)</b>
<b>Horno BA-1</b>	7386,6486	166536,3312	303427,0337	600
	5324,4324	124350,8875	202284,6891	
	3993,3243	93263,1656	15173,5168	
	<b>1996,6622</b>	<b>46631,5828</b>	<b>75856,7584</b>	
<b>LMP (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	
	<b>CO (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>NO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>SO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>X (m)</b>
<b>Horno H-751</b>	265410,8266	627372,8114	201186,4471	600
	176940,5511	418248,5409	134124,2981	
	132705,4133	313666,4057	100593,2235	
	<b>66352,7067</b>	<b>156843,2028</b>	<b>50296,6118</b>	
<b>LMP (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	
<b>Unidad de Destilación Atmosférica 2 (DA-2)</b>				
	<b>CO (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>NO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>SO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>X (m)</b>
<b>Horno H-2</b>	7917,5666	855097,1902	11171,6527	600
	5278,3777	570064,7934	7447,7685	
	3958,7833	427548,5951	5585,8264	
	<b>1979,3916</b>	<b>213774,2975</b>	<b>2792,9132</b>	
<b>LMP (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	

**Tabla 4.17.** Resultados arrojados por el Software DISPER 4.0. (Continuación).

Unidad de Destilación Atmosférica 2 (DA-2)				
	CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	X (m)
<b>Horno B-101</b>	299573,3213	26935,5491	1944,2065	600
	199715,5475	17957,0327	12962,8043	
	149786,6606	13467,7745	9722,1032	
	<b>74893,3303</b>	<b>6733,8873</b>	<b>4861,0516</b>	
<b>LMP (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	
Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC)				
	CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	X (m)
<b>Horno B-51</b>	71377,0827	581374,5803	108413,4890	600
	47584,7218	387583,0536	72275,6593	
	35688,5413	290687,2902	54206,7445	
	<b>17844,2707</b>	<b>145343,6451</b>	<b>27103,3722</b>	
<b>LMP (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	
Unidad de Alquilación				
	CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	X (m)
<b>Horno H3</b>	127211524,4441	97686,4343	373715,6992	600
	84807682,9627	65124,2896	249143,7994	
	63605762,2221	48843,2172	186857,8496	
	<b>31802881,1110</b>	<b>24421,6086</b>	<b>93428,9248</b>	
<b>LMP (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	

**Tabla 4.17.** Resultados arrojados por el Software DISPERS 4.0. (Continuación).

Unidad de Hidroprocesos				
	CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	X (m)
<b>Horno B-1901</b>	4579,5507	315930,8290	9663,2184	600
	3053,0338	210620,5526	6442,1456	
	2289,7754	157961,4145	4831,6092	
	<b>1144,8877</b>	<b>78982,7072</b>	<b>2415,8046</b>	
<b>LMP (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	
	CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	X (m)
<b>Horno B-1902</b>	4301,9095	441624,9687	6464,9455	600
	2867,9396	294416,6458	4309,9637	
	2150,9547	220812,4843	3232,4728	
	<b>1075,4774</b>	<b>110406,2422</b>	<b>1616,2364</b>	
<b>LMP (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	
	CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	X (m)
<b>Horno B-2001/2002/2003</b>	4108,8690	164354,7597	13782,7158	600
	2739,2460	109569,8398	9188,4772	
	2054,4345	82177,3798	6891,3579	
	<b>1027,2172</b>	<b>41088,6899</b>	<b>3445,6789</b>	
<b>LMP (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	

**Tabla 4.17.** Resultados arrojados por el Software DISPERS 4.0. (Continuación).

Unidad de Hidroprocesos				
<b>Horno B-2004</b>	<b>CO (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>NO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>SO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>X (m)</b>
	2993,8959	308087,6457	6649,8525	600
	1995,9306	205391,7638	4433,2350	
	1496,9480	154043,8229	3324,9262	
	<b>748,4740</b>	<b>77021,9114</b>	<b>1662,4631</b>	
<b>LMP (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	
<b>Horno B-4501</b>	<b>CO (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>NO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>SO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>X (m)</b>
	27874,7499	436022,0639	7877,4043	600
	18583,1666	290681,3759	5251,6029	
	13937,3749	218011,0319	3938,7022	
	<b>6968,6875</b>	<b>109005,5160</b>	<b>1969,3511</b>	
<b>LMP (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	
<b>Horno B-4503</b>	<b>CO (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>NO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>SO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>X (m)</b>
	4321,1046	455490,6412	16388,5629	600
	2880,7364	303660,4275	10925,7086	
	2160,5523	227745,3206	8194,2814	
	<b>1080,2762</b>	<b>113872,6603</b>	<b>4097,1407</b>	
<b>LMP (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	

**Tabla 4.17.** Resultados arrojados por el Software DISPER 4.0. (Continuación).

Servicios Industriales				
Caldera 1	CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	X (m)
	4658,6976	493604,3819	16975,9725	600
	3105,7984	329069,5879	11317,3150	
	2329,3488	246802,1909	8487,9862	
	<b>1164,6744</b>	<b>123401,0955</b>	<b>4243,9931</b>	
LMP ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	
Caldera 2	CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	X (m)
	2197131,6283	305898,7601	13329,3758	600
	1464754,4189	203932,5067	8886,2505	
	1098565,8141	152949,3800	6664,6879	
	<b>549282,9071</b>	<b>76474,6900</b>	<b>3332,3439</b>	
LMP ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	
Caldera 3	CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	X (m)
	104315,0786	906727,4157	10940,7904	600
	69543,3857	604484,9438	7293,8603	
	52157,5393	453363,7078	5470,3952	
	<b>26078,7697</b>	<b>226681,8539</b>	<b>2735,1976</b>	
LMP ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	
Caldera 4	CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	X (m)
	42583,6423	3678045,0942	26210,6362	600
	28389,0949	2452030,0628	17473,7575	
	21291,8211	1839022,5471	13105,3181	
	<b>10645,9106</b>	<b>919511,2735</b>	<b>6552,6599</b>	
LMP ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	

**Tabla 4.17.** Resultados arrojados por el Software DISPER 4.0. (Continuación).

Servicios Industriales				
<b>Turbogenerador 6</b>	<b>CO (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>NO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>SO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>X (m)</b>
	348097,3714	378151,1674	15020,1767	600
	232064,9143	252100,7783	10013,4511	
	174048,6857	189075,5837	7510,0883	
	<b>87024,3429</b>	<b>94537,7918</b>	<b>3755,0442</b>	
<b>LMP (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	
<b>Turbogenerador 7</b>	<b>CO (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>NO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>SO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>X (m)</b>
	309534,2629	1073789,0977	8330,8598	600
	206356,1753	715859,3985	5553,9066	
	154767,1314	536894,5488	4165,4299	
	<b>77383,5657</b>	<b>268447,2744</b>	<b>2082,7150</b>	
<b>LMP (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	
<b>Turbogenerador 8</b>	<b>CO (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>NO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>SO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>X (m)</b>
	85020,7477	1111261,6579	29696,6945	600
	56680,4984	740841,1053	19797,7963	
	42510,3738	555630,8290	14848,3473	
	<b>21255,18</b>	<b>277815,4145</b>	<b>7424,1736</b>	
<b>LMP (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>15000</b>	<b>315</b>	<b>366,83</b>	

Es de notar en la tabla 4.17, que los contaminantes NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> excedieron el límite máximo permisible (LMP) establecido en el Decreto 638 en todas las fuentes fijas de cada unidad de proceso, es decir, estuvieron por encima de 315  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 366,83  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente; sin embargo el CO presentó concentraciones por encima del LMP sólo en fuentes fijas, siendo éstas: horno H-751, horno B-101, horno



B-51, regenerador D-1, horno H3, caldera 2, caldera 3, turbogenerador 6, turbogenerador 7 y turbogenerador 8.

De igual forma, se observa que la caldera 4 emite la mayor concentración de  $\text{NO}_2$  ( $919511,2735 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y el horno B-101 la menor concentración de este compuesto ( $6733,8873 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Por otro lado, el regenerador D-1 presentó las mayores concentraciones de CO y  $\text{SO}_2$  ( $3180281,1110 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $93428,9248 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), esto puede ser producto de que la tasa de entrada de aire al regenerador se encontró fuera del rango establecido para garantizar una combustión, dando lugar a emisiones de CO significativa por último, las menores concentraciones de estos gases las presentaron el horno B-2004 y el horno B-1902, respectivamente ( $748,4740 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $1616,2364 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

La mayor emisión de contaminantes atmosféricos está representada por el regenerador D-1, siendo éste el más crítico en vista de que arrojó la mayor concentración de CO, el cual es el contaminante más tóxico o nocivo para la salud, seguido de los turbogeneradores, las calderas y en último lugar los hornos, en donde el horno B-2001/2002/2003 resultó ser el menos crítico. Finalmente, se tiene que la unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado y la unidad de Hidroprocesos, fueron las más crítica y menos crítica, respectivamente.

Estos niveles de concentraciones que sobrepasan el límite máximo permisible, reflejan que el área afectada por estos contaminantes son consideradas como zonas con un aire moderadamente contaminado.

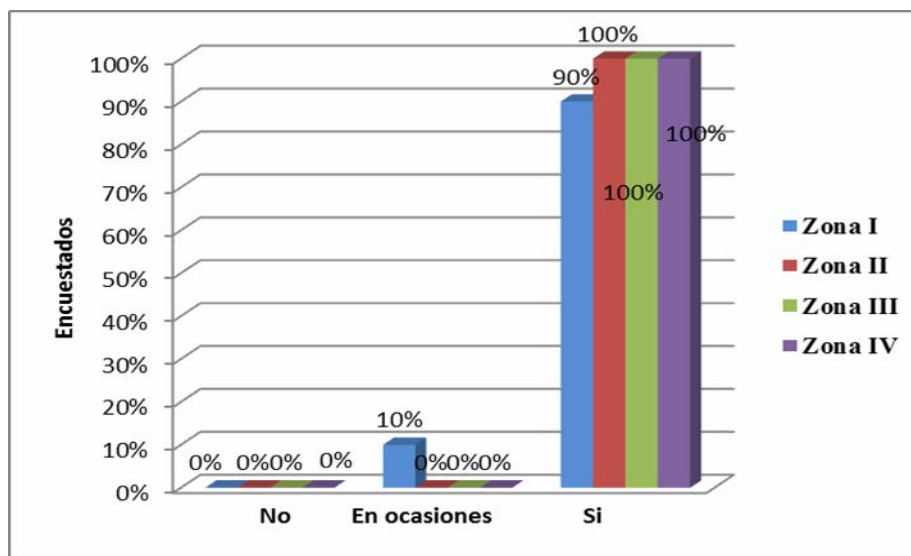
Es importante recalcar, que el comportamiento del gas  $\text{H}_2\text{S}$  no pudo ser modelado, debido a que el Software DISPER 4.0 no admite valores para este compuesto, esto por el hecho de que al ser un gas altamente tóxico no requiere ser modelado para determinar el impacto que éste genera sobre el ambiente y la salud de

las personas, sino que se deben tomar medidas de mitigación inmediatas al detectar la presencia de este contaminante. Tampoco se pudo comparar la concentración de este gas emitida por las fuentes fijas con los límites de emisión establecidos por la norma, ya que no se ha establecido límite para este contaminante según el tipo de proceso.

#### 4.5. Análisis del impacto sobre la salud de la población perteneciente a las zonas aledañas a la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui.

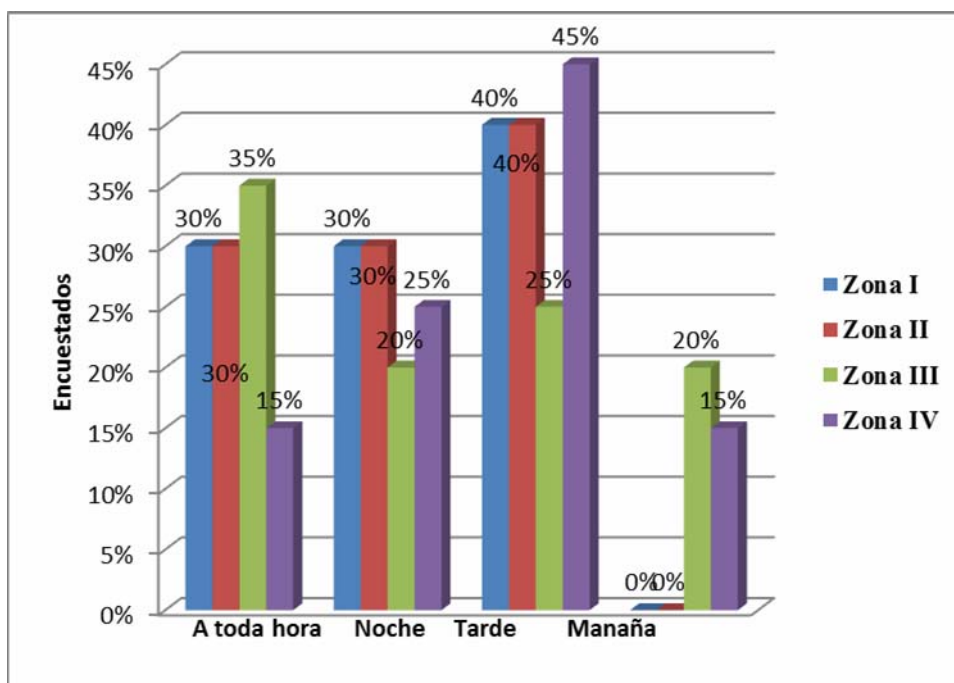
##### 4.5.1. Resultados de las encuestas realizadas:

Los resultados obtenidos de las encuestas realizadas por SALUDANZ, se muestran en las siguientes figuras (4.46 - 4.50), en donde la Zona I corresponde al sector de Guanire, la Zona II al sector de Gulf, la Zona III al sector de Chuparin y por último la Zona IV correspondiente al sector de Guaraguao:



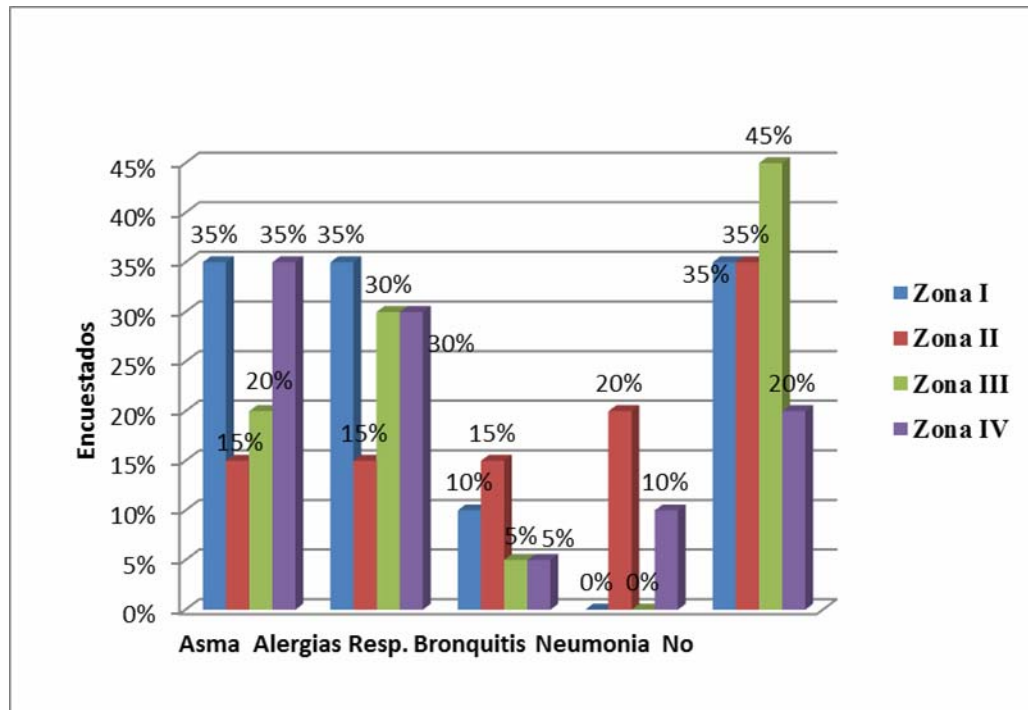
**Figura 4.46.** Respuesta a la pregunta 1. ¿Huele usted los gases de Refinería cerca de su casa?

En la figura 4.46 se observa que la totalidad de encuestados en las diferentes zonas, perciben el olor de los gases emitidos por la Refinería. Sólo un 10% de las personas encuestadas en la zona de Guanire, respondieron que en ocasiones huelen estos gases. Esto se debe a que la dirección del viento se dirige en forma más pronunciada hacia las zonas de Chuparin, Gulf y Guaragua.



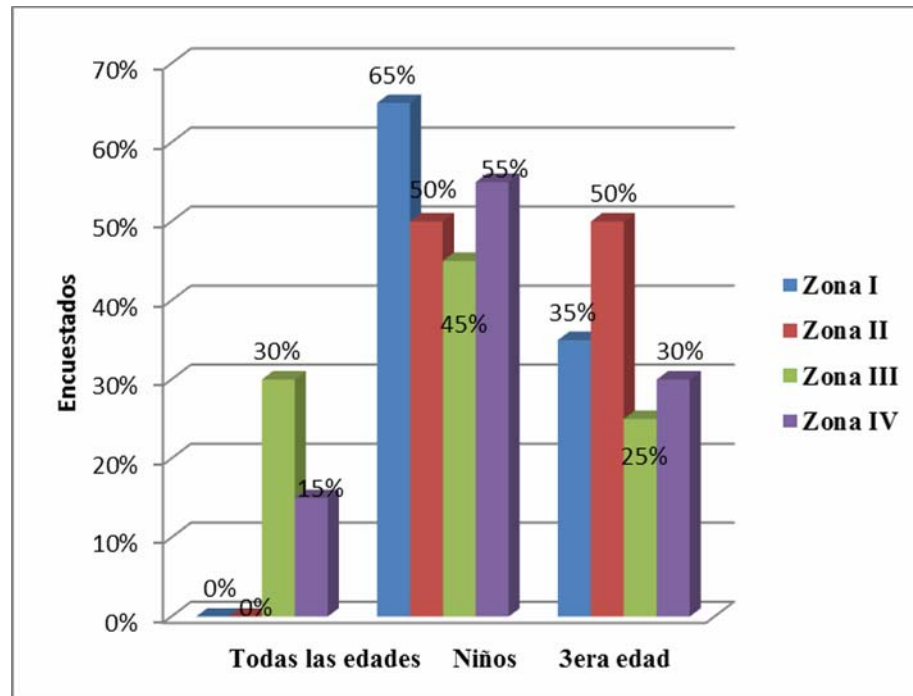
**Figura 4.47.** Respuesta a la pregunta 2. ¿A qué hora es más frecuente este olor?

Es de notar que en horas de la tarde es más frecuente el olor de los gases contaminantes provenientes de la Refinería, según las opiniones de los encuestados en las zonas I, II y IV (Guanire, Gulf y Guaragua), por el contrario en la zona de Chuparín, la mayoría de los habitantes perciben estos olores a toda hora. También se pudo apreciar que es menos frecuente la percepción de estos gases en las cuatro (4) zonas. Lo que puede significar que en horas de la tarde se realizan la mayor parte de las actividades en la Refinería.



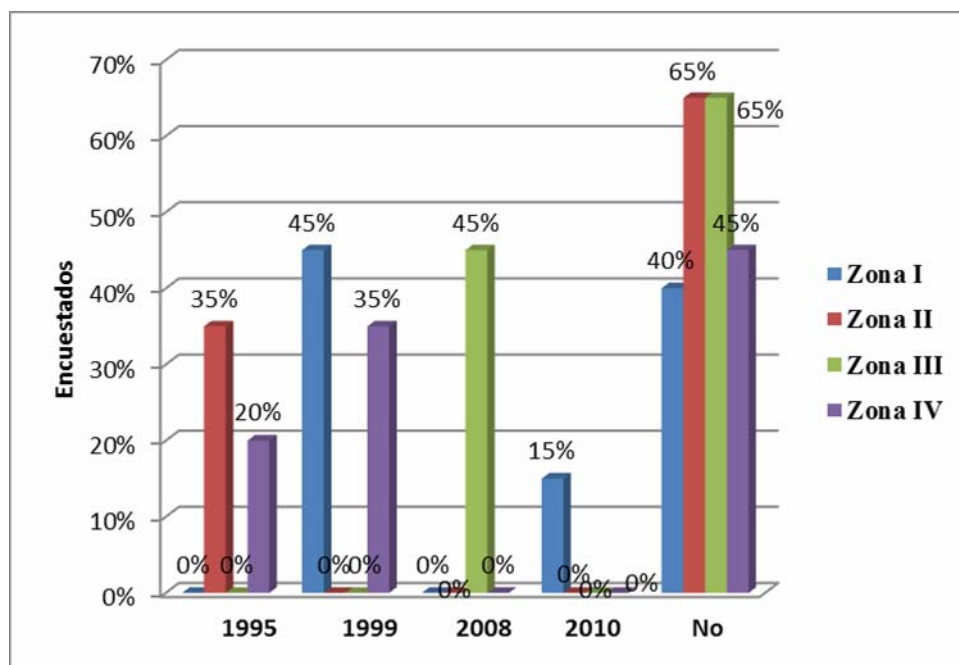
**Figura 4.48.** Respuesta a la pregunta 3. ¿Sufre usted de alguna enfermedad respiratoria?

En la figura 4.48 se observa en orden decreciente que las enfermedades con mayor incidencia en la población son: alergias respiratorias, asma, bronquitis y por último neumonía, siendo la zona IV (Guaraguao), la que presentó un mayor índice de enfermedades con un porcentaje de 80%, ya que la dirección del viento tiene una mayor influencia sobre ésta zona y los habitantes de la zona III (Chuparín) resultaron ser los menos afectados presentando un porcentaje de 55%.



**Figura 4.49.** Respuesta a la pregunta 4. ¿Cuáles son las edades que más sufren de estos males?

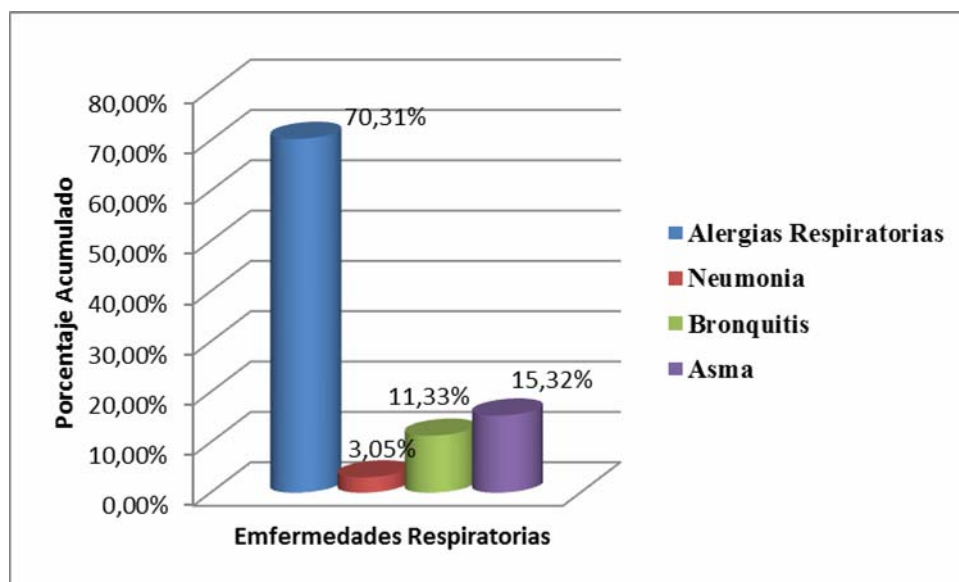
Se puede apreciar en la figura 4.48, que las cuatro (4) zonas encuestadas coincidieron en que los niños y las personas de tercera edad son las más susceptibles a presentar este tipo de enfermedades.



**Figura 4.50.** Respuesta a la pregunta 5. ¿Ha sufrido usted algún accidente de fugas masivas de gases provenientes de la Refinería de Puerto La Cruz?

Se puede observar en la figura 4.49 que en los años 1999 y 2008, las zonas I y III fueron las más afectadas, producto de accidentes por fugas masivas de gases no controladas. En los años 1995 y 1999 se obtuvo un mayor porcentaje de personas que fueron víctimas de desalojos por emisiones contaminantes provenientes de la Refinería. Sin embargo, en el año 2010 únicamente el sector de Guanire tuvo que desalojar por causa de emisiones fuertes de gases emitidos por los procesos de refinación, siendo éste el año menos afectado por estas emisiones.

#### 4.5.2. Record actual de enfermedades respiratorias en los sectores de Guanire, Gulf, Chuparin y Guaraguo.



**Figura 4.51.** Acumulado de Enfermedades Respiratorias en el año 2010.

Como se puede observar en la figura 4.51, el mayor índice de enfermedades respiratorias corresponde a las alergias con un porcentaje de 70,31%, seguido de asma, bronquitis y neumonía, cuyos valores en porcentaje son los siguientes: 15,32%, 11,33% y 3,05%, respectivamente.

Este record permite corroborar los resultados obtenidos en las encuestas realizadas en las zonas aledañas a la Refinería, ya que en ambas se obtuvieron tanto los mismos tipos de enfermedades como el orden en grado de incidencia.

#### 4.6. Evaluación de las mejores técnicas de mitigación de las emisiones atmosféricas en la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui.

Una vez estudiadas y analizadas las técnicas de mitigación de emisiones atmosféricas, se procedió a seleccionar entre ellas la mejor técnica que permita una mayor eficiencia en cuanto al control de estos gases contaminantes (Tabla 4.18), en función de sus ventajas y desventajas.

**Tabla 4.18.** Eficiencia y eficacia en técnicas de mitigación de emisiones contaminantes

<b>Técnica</b>	<b>Eficiencia</b>	<b>Eficacia</b>
<b>Adsorción</b>	<b>Alta</b>	<b>Mayor</b>
<b>Absorción</b>	<b>Alta</b>	<b>Bajo costo</b>
<b>Condensadores</b>	<b>Alta sólo en COV</b>	<b>Mayor costo</b>
<b>Oxidación Térmica</b>	<b>Baja</b>	<b>Menor costo y tiempo</b>

##### 4.6.1. Mejor técnica de mitigación de emisiones atmosféricas

Luego de haber estudiado la eficiencia y eficacia de cada una de las técnicas de control evaluadas, se seleccionó la técnica de absorción, ya que permite alcanzar una mayor eficiencia en cuanto a disminución de gases contaminantes y son económicamente rentable como se muestra en la tabla 4.18; así mismo a pesar de presentar problemas de corrosión, se puede utilizar un plástico reforzado con fibra de vidrio y solventar tal problema.

Si el reciclado de la sustancia tratada es posible y económicamente viable, se prefieren las tecnologías no destructivas, en vista de que la oxidación térmica a pesar de ofrecer una destrucción entre el 95% y 99%, pueden originar una contaminación



secundaria adicional que debería ser tratada posteriormente, ya que día a día estaría incrementándose pudiendo llegar a concentraciones iguales o superiores al límite ambiental permisible, causando alteraciones significativas en el ambiente y en la salud de las personas.

Con respecto a los COV, se recomienda la técnica de condensación debido a que el producto obtenido puede ser tratado, reutilizado, vendido o quemado.

## CONCLUSIONES

1. El regenerador D-1 presentó el mayor índice de monóxido de carbono por concentración de fuente fija.
2. La caldera 4 presentó el mayor índice de NO<sub>2</sub> por concentración de fuente fija.
3. La mayor concentración de SO<sub>2</sub> por fuente fija la obtuvo el regenerador D-1.
4. Las válvulas constituyen el accesorio que emite mayor concentración de emisiones fugitivas, seguido de los conectores y por último las líneas de salida.
5. Los COV representan los compuestos con mayor concentración de emisiones fugitivas en los diferentes accesorios estudiados.
6. Los turbogeneradores y los flare constituyen las fuentes fijas que emiten mayor concentraciones de emisiones fugitivas.
7. Las concentraciones de los contaminantes NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> obtenidas en el DISPER 4.0 excedieron el límite máximo permisible (LMP) en todas las fuentes fijas de cada unidad de proceso.
8. El regenerador D-1 presentó las mayores concentraciones de CO y SO<sub>2</sub> (3180281,1110 µg/m<sup>3</sup> y 93428,9248 µg/m<sup>3</sup>) obtenidas por el software DISPER 4.0.
9. La unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado y la unidad de Hidroprocesos, fueron las más y menos críticas, respectivamente.
10. La población cercana a la Refinería de Puerto La Cruz perciben los olores de gases contaminantes con mayor frecuencia en horas de la tarde.

11. Las enfermedades más comunes en las zonas encuestadas son asma y alergias respiratorias.
12. En el año 1999 se obtuvieron mayor número de desalojos de la población cercana a la Refinería por concepto de fugas masivas de gases contaminantes.
13. La técnica de absorción resultó ser la más eficiente y rentable.

## RECOMENDACIONES

1. Los resultados de emisiones y dispersiones atmosféricas presentados en este documento son teóricos, se deben realizar mediciones experimentales para validarlos, a través de la contratación de empresas especializadas en medición de calidad del aire.
2. Se recomienda como medida preventiva la utilización de equipos de protección personal contra benceno y sulfuro de hidrógeno para los trabajadores que requieran laborar en las siguientes áreas: turbocompresores, hornos, intercambiadores gas - gas de alta presión, intercambiadores gas –gas de baja presión, intercambiadores gas - líquido y calderas.
3. Instalar lo antes posible un sistema que permita minimizar las emanaciones de gases contaminantes dentro de las normativas vigentes. Se recomienda un sistema de condensación, donde los productos no condensables sean quemados.
4. Realizar mediciones experimentales de emisiones fugitivas con equipos especializados que permitan obtener valores más precisos y por ende un análisis completo del total de emisiones generadas en los principales procesos de refinación.
5. Implementar las estrategias y/o técnicas para el mejoramiento de la calidad del aire propuestas en la presente Investigación.
6. Para la simulación de los gases emitidos durante los procesos de refinación se sugiere analizar el comportamiento de estos anualmente, si se cuenta con dichas concentraciones.

7. Incluir en la caracterización de emisiones atmosféricas, el estudio de las emisiones fugitivas provenientes de los accesorios y equipos que conforman las fuentes fijas y así disponer de un análisis completo de gases contaminantes por parte de una Refinería.
  
8. Se recomienda evaluar la dispersión de gases contaminantes provenientes de las fuentes fijas de las unidades de procesos de la Refinería de Puerto La Cruz, con el software DISPER 4.0, a una distancia de 2000 m aproximadamente, ya que las zonas expuestas se encuentran a esta distancia promedio y cotejarlas con un mapa de riesgo.
  
9. Verificar que la tasa de aire de entrada al regenerador de la unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado se encuentre a 6 psi y a la salida de 9 psi con una temperatura de 1125 °F para garantizar una combustión completa.

## BIBLIOGRAFÍA

1. CUESTA, O. **“Calidad del Aire Experimental en una Zona de la Ciudad de Habana con fuerte Influencia Industrial y del Tráfico Automotor”**, Cuba. (1997).
2. CAMARGO, O. **“Calidad del Aire en la Ciudad de Panama”**, Panama. (2008).
3. ROJAS, G. **“Calidad del Aire Interior en la Biblioteca Dr. Luis García Pellisier de la Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui”**, Puerto La Cruz, estado Anzoátegui. (2009).
4. RUIZ y YEGRES. **“Concentraciones de COV en las prácticas de Laboratorio de Procesamiento de Hidrocarburos del Departamento de Petróleo de la Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui”**, Puerto La Cruz, estado Anzoátegui. (2009).
5. ARÉVALO, J. **“Evaluación de la Calidad del Aire en Áreas Operativas de la IPPCN”**, Puerto La Cruz, estado Anzoátegui. (2008).
6. GRIMALDO, L. **“Contaminación Ambiental a Causa de las Refinerías”**, CD Madero, Tamaulipas. (2009).
7. GUERRA, O. **“Fundamentos Teóricos de Fraccionamiento de Hidrocarburos”**, Barcelona. (2005).
8. FORRARA, G, LARA, M y NAJUL, M. **“Fundamentos para la Evaluación y Control de la Calidad Ambiental”**. (2008).
9. HARE, T. **“Enciclopedia de Ecología”**, Ediciones SM. (1996).

10. DE NEVERS, N. **“Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire”**, Editorial McGraw-Hill, México. (1997).
11. Norma EPA. **“Normas para la estimación de emisiones fugitivas por combustión”**. (2003).
12. KIELY, G. **“Ingeniería Ambiental”**. Volumen II. Editorial McGraw- Hill. España. (1999).
13. TURMO, E y CUSCO, J. **“Modelos de dispersión de gases y/o vapores en la atmósfera: fuentes puntuales continuas”**. (2008).
14. GALLARDO, L. **“Modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos”**. (2008).
15. TORRES, R. **“Modelo de dispersión en la atmósfera”**. (2008).
16. Manual del Software DISPER 4.0. **“Dispersión de contaminantes en la atmósfera”**. Editorial Cnarina. España. (2005).
17. SIERRA, S. **“Eliminación de compuestos orgánicos volátiles del ambiente”**, España. (2001).
18. ROJAS y MAGO. **“Caracterización de Emisiones Atmosféricas por fuente fija de PDVSA, Refinería de Puerto La Cruz”**, Puerto La Cruz, estado Anzoátegui. (2010).

## METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

TÍTULO	EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS Y FUGITIVAS EMITIDAS EN LAS PRINCIPALES UNIDADES DE PROCESOS PERTENECIENTES A LA REFINERÍA DE PUERTO LA CRUZ, ESTADO ANZOÁTEGUI.
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
<b>Vicmelys Andrea Cordero Velásquez</b>	CVLAC: V- 17.431.052 E MAIL: dalisette.17@gmail.com
<b>Nelglis Sinai Hernández Bellorín</b>	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALABRAS O FRASES CLAVES:

EMISIONES ATMOSFÉRICAS

UNIDADES DE PROCESO

REFINERÍA

CONTAMINACIÓN

EMISIONES FUGITIVAS



## METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

ÁREA	SUBÁREA
INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS	INGENIERÍA DE PETRÓLEO

### RESUMEN (ABSTRACT):

El presente estudio se realizó con la finalidad de evaluar las emisiones atmosféricas y fugitivas emitidas en las principales unidades de procesos pertenecientes a la Refinería de Puerto La Cruz, estado Anzoátegui, en las zonas aledañas a ésta, teniendo como objetivo primordial seleccionar las mejores técnicas que permitan la reducción de la concentración de los gases contaminantes provenientes de la Refinería, que generan un impacto en el ambiente y en la salud de los seres que habitan en estos sectores. Para efectuar la evaluación de dichos gases, se utilizó como herramienta de análisis la norma EPA (2003) y posteriormente con la ayuda del software DISPER 4.0 se modeló el comportamiento de los contaminantes atmosféricos producto de la combustión provenientes de las principales unidades de proceso de la Refinería, para así determinar el área de impacto o alcance de estos en el ambiente. Para ello, se realizó un diagnóstico de la caracterización de emisiones atmosféricas aportada por la Refinería de Puerto La Cruz y se identificaron las principales fuentes de emisión de cada unidad de procesos, con su respectivas concentraciones. Seguidamente se establecieron las emisiones fugitivas por concepto de componentes (accesorios y equipos). La medición de las concentraciones de estos contaminantes atmosféricos, fueron comparados con la normativa ambiental correspondiente (Decreto 638), para así estimar la calidad del aire en las zonas más afectadas. Entre los resultados más resaltantes se puede destacar que dentro de las unidades de procesos estudiadas, la que presentó mayor emisión de contaminantes atmosféricos fue la unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado, cuyos compuestos excedieron el límite máximo permisible. En lo que respecta a emisiones fugitivas, las válvulas representaron el componente que arrojó mayor emisión por este concepto. En este sentido, se seleccionaron técnicas que permitan disminuir la concentración de contaminantes durante los procesos de refinación.

## METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

### CONTRIBUIDORES

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL			
<b>GUERRA, OLY</b>	<b>CA</b>	<b>AS X</b>	<b>TU</b>	<b>JU</b>
	<b>CVLAC:</b>	V- 3.733.796		
	<b>E_MAIL</b>	OLYGUERRA1@YAHOO.COM		
	<b>E_MAIL</b>			
<b>ARDITTI, LORENZO</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU X</b>
	<b>CVLAC:</b>	V- 5.187.964		
	<b>E_MAIL</b>			
	<b>E_MAIL</b>			
<b>PATIÑO, RAYDA</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU X</b>
	<b>CVLAC:</b>	V- 11.833.699		
	<b>E_MAIL</b>	RAYDAPATIÑO@GMAIL.COM		
	<b>E_MAIL</b>			
	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU</b>
	<b>CVLAC:</b>			
	<b>E_MAIL</b>			
	<b>E_MAIL</b>			
	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU</b>
	<b>CVLAC:</b>			
	<b>E_MAIL</b>			
	<b>E_MAIL</b>			

### FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2011	03	21
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE: ESPAÑOL

## METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS. Evaluación de las Emisiones Atmosféricas y Fugitivas Emitidas en las Principales Unidades de Procesos pertenecientes a la Refinería de Puerto La Cruz.doc	Application/msword

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L M N O P  
Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.**

**ALCANCE**

**ESPACIAL:** \_\_\_\_\_

**TEMPORAL:** \_\_\_\_\_

**TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Ingeniero de Petróleo

---

**NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Pregrado

---

**ÁREA DE ESTUDIO:**

Departamento de Ingeniería de Petróleo

---

**INSTITUCIÓN:**

Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui

---

## **METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO**

### **DERECHOS**

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado:  
*“Los trabajos son propiedad exclusiva de la Universidad de Oriente, y solo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento expreso del Consejo de Núcleo respectivo, quien participará al Consejo de Universidades”*

---

**AUTOR**  
Vicmelys Andrea Cordero Velásquez

---

**AUTOR**  
Nelglis Sinai Hernández Bellorín

---

**TUTOR**  
Ing. Oly Guerra

---

**JURADO**  
Ing. Rayda Patiño

---

**JURADO**  
Ing. Lorenzo Arditti

---

**POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS**

**Prof. Rayda Patiño**