

**EVALUACION DE ATMOSFERAS PELIGROSAS EN LA  
CENTRAL TERMOELECTRICA“ATONIO GUITERAS” DE  
MATANZAS.**

**Ing. Daimarys Castro Hernández. MSc<sup>1</sup>, Ing. Katery Castro Castillo<sup>2</sup>.**

*1. Universidad de Matanzas, Km 3 ½ Carretera a Varadero,  
Cuba.*

*2. Universidad de Matanza, Km 3 ½ Carretera a Varadero,  
Cuba.*

**Matanzas, 2014**

## Resumen.

La Termoeléctrica Antonio Guiteras se encuentra enclavada en la Zona Industrial de Matanzas. En la misma existen almacenadas sustancias peligrosas como el Propano, Diesel e Hidrógeno, las cuales pueden producir un accidente químico. En el presente trabajo se realiza la caracterización de las mismas y se aplica el *software* ALOHA para determinar las áreas de atmósferas peligrosas que pudieran ser causada debido a un escape o una explosión de estas sustancias, además se realiza un análisis de la influencia de la radiación térmica y la sobrepresión provocada por un *Bleve*, un *Jet Fire* y una explosión de una nube de vapor sobre las personas y la planta.

*Palabras claves:* Sustancias peligrosas, atmósferas peligrosas, *Bleve*, *Jet Fire*, explosión.

---

## Introducción.

En los últimos años se le ha otorgado gran importancia, a nivel mundial, al estudio de los riesgos industriales. En Cuba, particularmente, la prevención de accidentes de cualquier tipo siempre ha sido una preocupación permanente del Estado Revolucionario (Castro, 2014).

Según Perera, (2006), para la provincia de Matanzas, la vigilancia de la atmósfera se desarrolla desde hace más de 35 años, por los grupos de Pronóstico y Clima del Centro Provincial de Meteorología y sus redes de estaciones (pertenecientes a la Delegación Territorial de CITMA, Matanzas), los cuales ejecutan los programas de vigilancia a escalas local y regional, tanto meteorológica como climática, además del monitorio de la calidad del aire, todo esto basado en el programa establecido por el Sistema de Vigilancia de la Atmósfera (VGA).

La Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras” de Matanzas, no está ajena a los riesgos industriales, ya que la misma tiene como objetivo secundario el almacenamiento de sustancias peligrosas, siendo entonces de vital importancia la realización de análisis de las atmósferas peligrosas que podrían desatar dichas sustancias.

Esta entidad ha sido objeto de estudio de riesgos en los últimos años por parte de profesores y estudiantes de la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, sin embargo existen estudios realizados por (Orozco, 2007, López, 2010, Castro, 2014), pero no recogen todas las sustancias peligrosas que existen en dicha industria y el riesgo que ellas pueden causar.

## Definiciones y conceptos.

### Riesgo.

El riesgo es la probabilidad de que ocurra un daño por determinado peligro; depende del peligro y de la exposición. Para definirlo de manera más formal se puede decir que es la posibilidad de que se produzca un evento dañino (muerte, lesión o pérdida) por exposición a un agente químico o físico en condiciones específicas; o alternativamente,

la frecuencia esperada de la aparición de un evento dañino (muerte, lesión o pérdida) por la exposición a un agente químico o físico en condiciones específicas (PNUMA/IPCS, 1999).

El riesgo es una situación que puede conducir a una consecuencia negativa no deseada en un acontecimiento, o bien la probabilidad de que suceda un determinado peligro potencial (entendiendo por peligro una situación física que puede provocar daños a la vida, a los equipos o al medio), o aún, consecuencias no deseadas de una actividad dada, en relación con la probabilidad de que ocurra, también se la denomina probabilidad de que una sustancia cause un efecto adverso en una situación particular de exposición (Vílchez, 2001).

Una definición simplificada que cumple estos requisitos y que es utilizada por muchos profesionales es la basada en el producto de la frecuencia prevista para un determinado suceso por la magnitud de las consecuencias probables:

Riesgo = frecuencia x magnitud consecuencias

Desde el punto de vista más concreto de las actividades industriales, los riesgos pueden clasificarse en otras tres categorías:

- Riesgos convencionales: relacionados con la actividad y el equipo existentes en cualquier sector (electrocución, caídas).
- Riesgos específicos: asociados a la utilización o manipulación de productos que, por su naturaleza, pueden ocasionar daños (productos tóxicos, radioactivos).
- Riesgos mayores: relacionados con accidentes y situaciones excepcionales. Sus consecuencias pueden presentar una especial gravedad ya que la rápida expulsión de productos peligrosos o de energía podría afectar a áreas considerables (escape de gases, explosiones).

### **Peligro.**

Es la posibilidad de que una sustancia, mezcla de sustancias o procesos que involucran sustancias –bajo ciertas condiciones de producción, uso o disposición– causen efectos adversos en los organismos o en el ambiente, por sus propiedades inherentes y de acuerdo con el grado de exposición; en otras palabras, es una fuente de daño (PNUMA/IPCS, 1999).

### **Evaluación del peligro.**

Según la directiva EC (93/21/EEC) de las Naciones Unidas que aparecen en PNUMA/IPCS (1999) las categorías para la determinación del peligro toxicológico son:

### **Peligros toxicológicos.**

Al evaluar una mezcla de sustancias, se le deberá asignar la categoría general de peligro del componente más peligroso. Una sustancia de toxicidad desconocida se debe considerar de alto peligro, a no ser que haya una buena razón para pensar lo contrario (Colectivo de autores, 1999).

### **Peligro especial.**

Las sustancias incluidas en esta categoría, entre ellas las carcinógenas, las mutagénicas y los compuestos con efectos tóxicos en el sistema reproductivo, son consideradas como muy peligrosas y deben ser evaluadas individualmente.

### **Peligro alto.**

Sustancias etiquetadas como “muy tóxicas”, “tóxicas”, “corrosivas” o sensibilizadoras de la piel.

### **Peligro medio.**

Las sustancias consideradas de peligro medio y que ingresan por inhalación o ingestión son etiquetadas como “dañinas” y las de daño medio para la piel, como “dañinas” o “irritantes”.

### **Peligro bajo.**

Son las sustancias no consideradas en ninguna de las otras categorías de peligro.

### **Peligros fisicoquímicos.**

Los principales peligros fisicoquímicos son la inflamabilidad y la capacidad explosiva/oxidante. En este grupo también se incluiría la emisión de radiación ionizante, pero se trata de un peligro menos común y en la mayoría de países se controla mediante una legislación diferente; normalmente, se considera por separado.

### **Inflamabilidad.**

Este peligro está relacionado principalmente con la seguridad física, aunque en algunos casos la producción de una sustancia tóxica por combustión o descomposición de materiales usados para extinguir un incendio puede dar lugar a un riesgo tóxico. Por lo general, en el caso de los líquidos, la inflamabilidad guarda una relación inversa con el punto de ignición: los líquidos con bajo punto de ignición tienden a ser asociados con un peligro muy alto, mientras que un punto de ignición alto generalmente indica un peligro bajo (Colectivo de autores, 1999).

### **Capacidad explosiva y oxidante.**

Si la etiqueta indica que la sustancia es explosiva u oxidante, se debe buscar la asesoría de un experto para determinar las precauciones específicas que será apropiado tomar. En caso de duda, se debe contactar al distribuidor (Colectivo de autores, 1999).

### **Riesgos más frecuentes en una termoeléctrica.**

Los principales riesgos en una termoeléctrica pueden estar dados por sustancias inflamables, recipientes a presión, vapor de agua, agua caliente, alto voltaje. Los mismos se pueden apreciar en accidentes de trabajo que afecten la integridad física del obrero por caídas, accidentes eléctricos y de mucha importancia el riesgo de contaminación por emanaciones a la atmósfera.

Las partículas, en especial las que provienen de procesos de combustión, pueden tener distintos tamaños que determinan el riesgo. Así, aquellas muy grandes son detenidas en la primera parte del tracto respiratorio, y terminan siendo deglutidas o expulsadas por la nariz.

Estas partículas se encuentran habitualmente en suspensión en el aire de las ciudades y son originadas por algunos procesos industriales (Rodríguez, 2006).

Mundialmente en las termoeléctricas se producen a través del proceso de combustión contaminantes como por ejemplo: CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> entre otros, pero no solo esos compuestos son peligrosos, también existen otras sustancias que son almacenadas para diferentes usos en el proceso como son: hidrógeno, propano, diesel, entre otras y por sus propiedades químico-físicas pueden originar riesgos mayores como se les describe a continuación:

### **Incendio**

Un accidente es un suceso fortuito e incontrolado, capaz de producir daños. En general, en la industria química este suceso coincide con situaciones de emisión, escape, vertido, incendio y explosión, donde están implicadas sustancias peligrosas. Si la situación generada se puede calificar como de riesgo grave, catástrofe o calamidad pública - inmediata o diferida- para las personas, el medio ambiente y los bienes, se la denomina “accidente mayor” (Vílchez, 2001).

Duarte, (2009) plantea que un incendio es una reacción química de oxidación - reducción fuertemente exotérmica, siendo los reactivos el oxidante y el reductor. En terminología de incendios, el reductor se denomina combustible y el oxidante, comburente; las reacciones entre ambos se denominan combustión. Para que un incendio se inicie es necesario que el combustible y el comburente se encuentren en espacio y tiempo en un estado energético suficiente para que se produzca la reacción entre ambos.

Diversos estudios basados en el análisis histórico de accidentes han revelado que después de los escapes, el incendio es el accidente que presenta un número mayor de registros, seguido por la explosión y la formación de una nube de gas (Casal, 1991).

### **Explosión**

Casal *et al.*, (2001) señala que en general se puede definir una explosión como una liberación repentina de energía, que genera una onda de presión que se desplaza alejándose de la fuente mientras va disipando energía. Esta liberación tiene que ser, no obstante, bastante rápida y concentrada para que la onda que se genera sea audible. Pueden ser físicas debido a la sobrepresión o fallo mecánico y las químicas que provocan una reacción exotérmica produciéndose grandes liberaciones de energía.

Según Nolan, (2011), las explosiones ocurren de manera tan rápida que sistemas convencionales de protección contra incendio son ineficaces. Una vez que ocurre la explosión los daños pueden ser el resultado de la sobrepresión (presión desarrollada por el gas en expansión y la atmósfera), el pulso (el diferencial de presión a través de la planta) y proyectiles. Los niveles de sobrepresión de la explosión son considerados los más peligrosos.

Las explosiones son generalmente reconocidas cuando la presión es súbitamente liberada, acompañada del estallido del recipiente, la proyección de fragmentos, la liberación de productos calientes y la generación de la explosión y ruido. Las explosiones pueden ser físicas, químicas o eléctricas (Wells, 2003).

### **Dardo de fuego (*Jet Fire*).**

Llama estacionaria y alargada (de gran longitud y poca amplitud) provocada por la ignición de un chorro turbulento de gases o vapores combustibles. Un ejemplo típico es el soplete.

Este tipo de incendio (*Jet Fire*) tiene lugar cuando se produce el vertido accidental de vapores o gases inflamables a presión, en áreas de proceso o depósitos de almacenaje (Casal *et al.*, 2001).

De acuerdo Wells, (2003) para el caso de los líquidos o compuestos en dos fases parte del líquido puede verterse en el suelo y formar lo que se conoce como piscina o charco de fuego. La duración de un *Jet Fire* está determinada por la velocidad con que se libera la sustancia y la capacidad del recipiente o la fuente que lo alimenta. La longitud de la llama se incrementa considerablemente con la velocidad del flujo de salida de la sustancia

### **Charco de fuego (*Pool Fire*).**

Combustión estacionaria con llama de difusión del líquido de un charco de dimensiones conocidas (extensión), que se produce en un recinto descubierto. En caso de que se produzca la ignición del líquido derramado, el tipo de fuego resultante dependerá en gran medida de si el escape es continuo o instantáneo. Si el escape es instantáneo, el líquido se irá esparciendo hasta que encuentre una barrera o hasta que se haya consumido todo el combustible en el incendio (Casal *et al.*, 2001).

### **BLEVE y bola de fuego (*Flash Fire*).**

BLEVE es el acrónimo inglés de "*boiling liquid expanding vapour explosion*" (explosión de vapores que se expanden al hervir el líquido). Este tipo de explosión ocurre sobre todo en tanques que almacenan gases licuados a presión y sobrecalentados, en los que por ruptura o fuga del tanque, el líquido del interior entra en ebullición y se incorpora masivamente al vapor en expansión (Bosch, 2006).

Las explosiones de tipo *BLEVE* son uno de los peores accidentes que pueden ocurrir en la industria química o en el transporte de mercancías peligrosas. Desde un punto de vista riguroso estas explosiones no siempre tienen efectos térmicos. Estas explosiones no siempre tienen efectos térmicos. No obstante, en la mayoría de los casos reales la sustancia involucrada es combustible; esto provoca que la explosión sea seguida por la formación de una bola de fuego, de efectos muy graves. En realidad, cuando se habla de BLEVE, en general a lo que se hace referencia realmente es a la combinación de los fenómenos BLEVE-bola de fuego, esto es, aun accidente que involucra simultáneamente efectos térmicos y mecánicos (Casal *et al.*, 2001).

### **Nube tóxica.**

Se refiere a escenarios que determinan fenómenos peligrosos asociados a la concentración de una sustancia emitida al ambiente (de tipo térmico para sustancias inflamables y de tipo químico para sustancias tóxicas). Un escape de un producto tóxico o inflamable en forma gaseosa, o bien en forma líquida en condiciones de ser vaporizado, produce una nube de gas (Wells, 1997).

### **Escapes.**

El escape de un fluido hacia la atmósfera puede producirse por diversas razones: por rotura de una conducción, por explosión de un recipiente a presión, por rebosamiento de un depósito, etc. Según la forma de salida y las características del fluido puede dar lugar a un incendio, una nube tóxica o inflamable, etc.

Cualquier escape que se produzca depende de las condiciones climatológicas:

- Temperatura del aire
- Velocidad del aire
- Humedad relativa
- Radiación solar

El tipo de estabilidad atmosférica es, pues, una estimación del estado de la atmósfera, que no se puede medir directamente como la temperatura, la presión, la velocidad del viento, etc. La estabilidad se estima en función de la velocidad del viento y la radiación solar (Casal *et al.*, 2001).

En el epígrafe posterior se explicara con más detalles sobre las variables climatológicas que inciden en la estabilidad atmosférica.

La autora está de acuerdo con lo planteado por Casal, (1991), pues el incendio es el accidente que presenta un número mayor de registros, seguido por la explosión y la formación de una nube de gas.

### **1.4. La dispersión de contaminantes químicos en la atmósfera.**

Casal, *et al* (2001), plantea que el término dispersión es utilizado en la modelación de accidentes para describir la evolución de una nube de gas tóxica o inflamable en la atmósfera. La dispersión de una nube de gas sigue una difusión, o transporte de su masa, producida por el movimiento molecular del aire mientras se va diluyendo a medida que va disminuyendo su concentración, a causa de la entrada de nuevas moléculas de aire dentro de la nube. La dispersión incluye el desplazamiento de la masa en la dirección del viento y su expansión en sentido transversal al viento, tanto vertical como horizontal. En el caso de gases pesados, la dispersión se produce incluso en dirección contraria al viento.

Las distintas variables meteorológicas afectan en mayor o menor grado la dispersión atmosférica de contaminantes. Así pues, la velocidad y la dirección del viento, junto con la estabilidad atmosférica, condicionan especialmente la dispersión de nubes de gas; la humedad y la temperatura tienen efectos menores, mientras que la inversión térmica influye en casos concretos. Todas las variables meteorológicas presentan una gran variabilidad estacional y diaria. Para posibilitar la modelización de la dispersión de manera representativa, se suelen tomar valores medios específicos del área de estudio.

A continuación se describen las variables meteorológicas principales que afectan a la dispersión de nubes contaminantes.

### **Influencia del viento.**

Según Casal, *et al* (2001) el viento tiene un efecto de arrastre que provoca la dispersión de nubes por desplazamiento de la masa de gas. El viento influye también en la estabilidad atmosférica, que es el otro factor principal para determinar la dispersión de gases. La información sobre el viento de una determinada zona geográfica, se reúne en la denominada “rosa de los vientos”. La rosa de los vientos es una representación gráfica de la frecuencia de los vientos según su dirección y velocidad. Las direcciones se suelen dar en 8 o 16 sectores de 45° o 22.5° respectivamente, denominados según las direcciones cardinales. Estas direcciones indican de dónde procede el viento.

Los datos del viento se miden a una determinada altura. Estos datos, y especialmente la velocidad del viento, varían en función de dicha altura. En general, la velocidad del viento registrada por los servicios meteorológicos se refiere a una altura de 10 m, este es el valor que suele utilizarse en los modelos de dispersión.

### **Estabilidad atmosférica.**

La estabilidad atmosférica es una variable que se establece para caracterizar la capacidad que la atmósfera tiene para dispersar un contaminante; en realidad, lo que representa es el grado de turbulencia existente en un momento determinado. Se ha establecido una clasificación en categorías (denominadas a menudo “categorías de Pasquill”) (Casal, *et al* 2001).

### **La temperatura y la humedad relativa.**

Según Casal, *et al* (2001) la temperatura y la humedad relativa son básicamente consecuencia de la estación del año. La humedad y la temperatura se utilizan para el cálculo de la velocidad de evaporación de un líquido. La humedad del aire sólo tiene efectos significativos sobre la dispersión de un contaminante si existe reactividad entre el producto y el vapor de agua contenido en la atmósfera.

### **La inversión térmica.**

La inversión térmica se caracteriza por un aumento anómalo de temperatura en las capas altas atmosféricas; es decir, a cierta altura (en general, alrededor de 100 m) la temperatura es superior a la de las capas de aire de cotas más bajas. Desde el punto de vista de la dispersión de gases, este es un efecto muy importante ya que impide la dispersión en altura y provoca su reflexión hacia las capas bajas atmosféricas (Casal, *et al*, 2001).

La autora está de acuerdo con Casal, *et al* (2001), Castro, (2014) lo que plantea en cuanto al término dispersión y la relación entre las diferentes variables meteorológicas, para conocerlas mejor se debe estudiar el clima y ver como cada una de ellas afecta en mayor o menor medida a la dispersión atmosférica de los contaminantes.

### **Software de evaluación de áreas de atmósferas peligrosas.**

En el mundo existen diferentes *softwares* que son utilizados para estimar áreas de atmósferas peligrosas como los que se describen a continuación:

### **Software SCREEN**

EPA-454/B95, (2004), plantea que el modelo de pluma Gaussiano SCREEN fue diseñado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) e incorporado a un programa de evaluación de fuentes puntuales en tres fases, en las que SCREEN puede utilizarse en la primera y segunda, ya que sus requisitos de información son mínimos y demanda poco tiempo de cómputo. La primera fase de la evaluación consiste en el diagnóstico de la(s) fuente(s). En la segunda fase expresan Herrera y Tello, (2007) que el diagnóstico se realiza con información meteorológica correspondiente a la zona de estudio y finalmente, en la tercera fase se realiza un análisis más fino del escenario.

La información básica demandada por el modelo SCREEN son los datos sobre emisiones de la fuente (g/s), la altura de la chimenea (m), el diámetro interior de la chimenea (m), la velocidad de salida del gas de la chimenea (m/s), la temperatura del gas de la chimenea (K), la temperatura ambiente (K) y la altura del receptor sobre el suelo (m).

### **Software CALMET y CALPUFF.**

El sistema de modelado CALMET y CALPUFF fue desarrollado por la EarthTech, Inc. (2000), citado por Fernández, (2003) y permite simular emisiones continuas de paquetes de contaminantes usando los campos de vientos particulares de una región específica. A través del modelo CALMET, se calculan las estructuras de viento del área de estudio y CALPUFF calcula la dispersión de contaminantes en los sitios receptores, tomando en cuenta campos de viento tridimensionales complejos, particularmente importante para las características de las termoeléctricas que se ubican en las áreas costeras.

### **Software DEGADIS**

El modelo DEGADIS (*Dense Gas Dispersión Model*) fue originalmente desarrollado principalmente para los Guardacostas de Estados Unidos y el Instituto de Investigación del Gas como citan Spicer y Havens, (2002), para la simulación de la dispersión de gases criogénicos inflamables. La implementación de DEGADIS en una computadora personal se patrocinó por el Instituto de Investigación del Gas y el Instituto Americano del Petróleo.

### **Software DISPER 5.2**

La versión DISPER 5.2 (Ingeniería de software: DISPER 5.2, 2012 es Ideal para estudios de impacto ambiental, auditorías medioambientales y para la gestión ambiental en general ya que permite evaluar los efectos posibles de una gran cantidad de fuentes de contaminación atmosférica como son: chimeneas, carreteras y vías de circulación, líneas férreas, vertederos al aire libre, incendios forestales, movimientos de tierra por obras, minas a cielo abierto y aplicaciones de pesticidas en cultivos. Evalúa de una manera rápida y sencilla la dispersión de cualquier contaminante atmosférico en el aire de menos de 10 micras de diámetro, como son: dióxido de nitrógeno, dióxido de carbono, sulfatos, metales pesados, compuestos inorgánicos, clorofluorocarbonados,

contaminantes secundarios, compuestos inorgánicos, óxidos, anhídridos, metales contaminantes, ozono, óxido nitroso, benceno, alcanos, compuestos orgánicos, sustancias organolépticas, anhídrido carbónico, amoníaco, dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarburos, pesticidas, plomo, arsénico, plaguicidas, compuestos orgánicos volátiles, lluvia ácida, smog, etc.

Permite realizar estudios de riesgo en industrias contaminantes ya que puede evaluar la contaminación bajo condiciones teóricas extremas (excesiva emisión, vientos fijos). Este software fue realizado íntegramente en castellano.

## **ALOHA.**

El Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente de Cuba recientemente ha oficializado el software ALOHA como herramienta para la determinación de atmósferas peligrosas que se originan a partir de diferentes accidentes.

El software ALOHA (*Areal Locations of Hazardous Atmospheres*, en español Localización de Áreas de Atmósferas Peligrosas) es un simulador que evalúa el desplazamiento y dispersión de vapores y gases. Fue elaborado por técnicos y especialistas estadounidenses en respuesta a las emergencias de los vertimientos de los vapores químicos. Este programa es capaz de proporcionar la información en situaciones donde haya vertimientos de vapores y gases, calculando el desplazamiento y la dispersión del mismo en la atmósfera. Predice la concentración de los contaminantes en la dirección de los vientos y el tiempo máximo al que pueden estar sometidas las personas a la nube inflamable dentro de las edificaciones protectoras.

La biblioteca química que posee el software contiene información acerca de las propiedades físicas de aproximadamente 1000 especies químicas comunes. Sus cómputos representan un compromiso entre exactitud y velocidad y ha sido diseñado para producir buenos resultados lo suficientemente rápido para que puedan usarlo los responsables de responder. Está diseñado para minimizar los errores del operador, ya que chequea la información que entra el usuario y avisa cuando se comete un error. (Manual de usuario del software ALOHA, 2007).

Las distintas fuentes de emisión que considera el software ALOHA son:

- Fuente directa: se emite directamente, es la que considera la emisión a través de una fuente puntual
- Fuente derrame: se emite produciendo un charco en la superficie del suelo.
- Fuente tanque: se emite a través de un tanque por roturas de este o por una pitera.
- Fuente tuberías de gas: se emite a través de piteras u otras roturas en la tubería de gases.

La autora considera que es importante que se aplique también el *Software CALMET* y *CALPUFF*, pues el mismo calcula la dispersión de los contaminantes en los sitios receptores de las termoeléctricas preferentemente y a diferencia del ALOHA no especifica las industrias en que se puede aplicar.

### **Análisis de consecuencias.**

El análisis de consecuencias es la evaluación cuantitativa de la evolución espacial y temporal de las variables físicas representativas de los fenómenos peligrosos, y sus posibles efectos sobre las personas, el medio ambiente y los bienes, con el fin de estimar la naturaleza y magnitud del daño.

Así, el objetivo principal del análisis de consecuencias es la delimitación de las áreas, en torno al origen de cada accidente, en las cuales se produce un determinado nivel de daño a las personas. Se trata pues de valorar la agresión que el accidente provoca sobre el medio que lo rodea (Servicio de Protección Civil, 2002).

### **Métodos para la determinación del efecto de la radiación y la sobrepresión sobre las personas y las edificaciones.**

Para acometer objetivo anteriormente expuesto, hay que recurrir a los criterios de letalidad. Existen unas ecuaciones, denominadas Probit, que relacionan las dosis (acumuladas al cabo de un determinado tiempo de exposición) con probabilidades de daño, normalmente muerte.

Según Wells, (2003) estas son ecuaciones que se usan para relacionar la intensidad de un fenómeno con el daño que puede causar este, tales como un incendio o explosión. Las funciones Probit fueron derivadas para determinar los daños de quemaduras de primer y segundo grado, así como las muertes por efecto de la radiación (TNO, 1989).

Según Wells, (2003) los efectos de la sobrepresión generada por una explosión no pueden ser determinados a través de las ecuaciones Probit, sino que deben ser estimadas a partir de otros métodos de evaluación de riesgos o de datos brindados por él, que correlacionan, a partir de su experiencia, los daños generados por la explosión con las correspondientes.

### **Caracterización de la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras”.**

La Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras” pertenece a la Unión Eléctrica (UNE) y al Ministerio de Energía y Minas; se encuentra ubicada en la Zona Industrial, específicamente en la costa norte de la provincia de Matanzas, a unos 8 km aproximadamente al Noreste de la propia ciudad. Consta de un grupo de tanques que contienen varios productos químicos, que en la siguiente tabla se mostrará la cantidad de sustancia almacenada:

**Tabla 1 Distribución de sustancias almacenadas en la industria.**

<b>Producto</b>	<b>Cantidad de tanques</b>	<b>Capacidad almacenada</b>
H <sub>2</sub>	50 botellas	50 kg
Diesel	1	20 m <sup>3</sup>
CO <sub>2</sub>	50 botellas	50 kg
Crudo	2	20 000 m <sup>3</sup>
G.L.P	1	3m <sup>3</sup>
Propano	32 botellas	45kg

El objetivo de dicha planta es generar y suministrar energía eléctrica al sistema eléctrico nacional, la cual está formada por Generador Vapor, turbina, el generador eléctrico y los equipos auxiliares (Tratamiento Químico de Agua, tanques y bombas de petróleo, bombas de alimentación de agua, bombas de condensado, bombas de circulación, condensador, calentadores de agua de tiro forzado y recirculadores de gases).

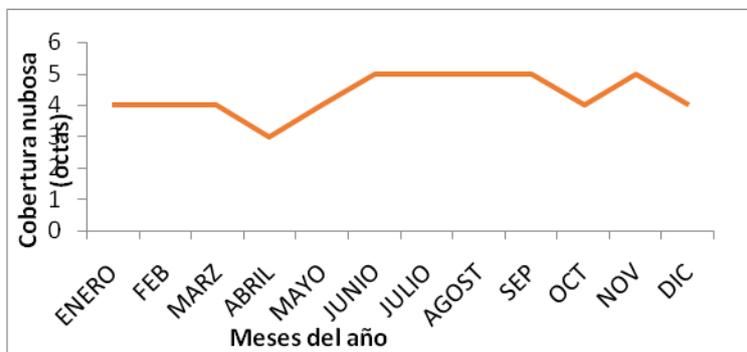
En la Planta de Tratamiento Químico de Agua existen diferentes sustancias tóxicas las cuales son productos tóxicos de interés como el Ácido Sulfúrico, Ácido Clorhídrico, Hidróxido de Sodio, Amoníaco, Hidracina. Estas sustancias fueron analizadas por Rodríguez, (2006).

Otra sustancia como el petróleo fue analizada por Hernández (2009).

## Resultados de la caracterización del clima de la zona objeto de estudio.

### 1. Nubosidad.

En las zonas costeras se presentan generalmente el máximo de días despejados, pues los mínimos de distribución son representativos en la región que estamos analizando.



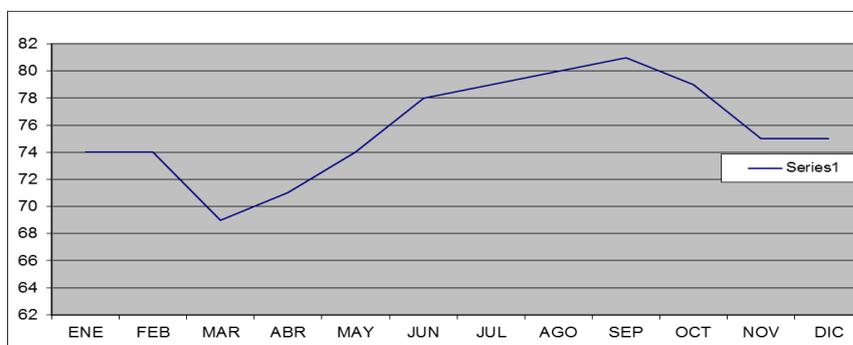
**Figura 1.** Comportamiento medio de la nubosidad para la zona objeto de estudio.

En el gráfico anterior se muestra que los meses del año con más nubosidad son: junio, julio, agosto y septiembre y el de menos valor es abril. Los datos para el periodo estudiado.

Una caracterización del clima de la zona industrial realizada por González, (2014), destaca que los meses de mayor nubosidad se extiende desde mayo a octubre y los de menos los meses restantes, el análisis coincide con lo planteado en la **figura 1**.

### Humedad del aire.

Por las características de la zona costera la humedad relativa muestra valores elevados durante el año. El promedio anual es de 76 %, con valores medios mensuales superiores a 75 % durante casi todo el año, sólo en el mes de marzo, que constituye el mes menos húmedo del año, se alcanza un valor del 69 %, mientras en agosto y septiembre, los meses de mayores reportes de humedad relativa, alcanzan valores de 80 y 81 % respectivamente.



**Figura 2.** Comportamiento de la humedad relativa media de la zona objeto de estudio.

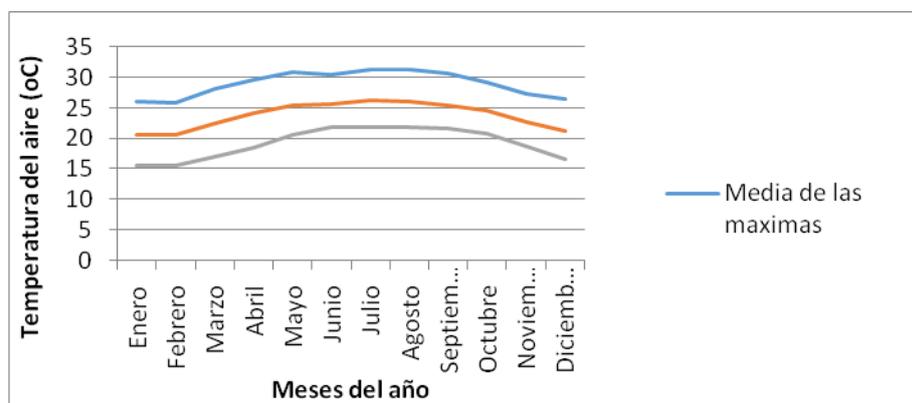
Como se puede apreciar los meses de mayor humedad relativa coincide con los meses más cálidos y los de mayor nubosidad de la región analizada.

Se analizó la variabilidad de este parámetro y en ningún mes el coeficiente de variación supera el 5 % garantizándose la estabilidad de la variable para cada uno de los meses.

### Temperatura del aire.

La temperatura del aire de la región alcanza su máximo valor anual en los meses de julio y agosto, mientras que el mínimo de la misma ocurre en enero y febrero.

En la figura que le presentamos a continuación se muestra la distribución de las temperaturas medias para cada mes del año.



**Figura 3.** Comportamiento de la temperatura media del aire para la región analizada.

Las temperaturas máximas promedios anuales son de  $30.3^{\circ}\text{C}$  representándose con mayor valor los meses de julio y agosto con  $32$  y  $32.5^{\circ}\text{C}$  respectivamente y los meses con más bajos valores son febrero y diciembre con  $26.3$  ambos.

La región en estudio se caracteriza por una temperatura media anual de  $25.4^{\circ}\text{C}$ , registrándose los valores más elevados del año en los meses de julio ( $28.7^{\circ}\text{C}$ ), y agosto ( $28.8^{\circ}\text{C}$ ), mientras los más bajos promedios mensuales se registran en enero ( $21.6^{\circ}\text{C}$ ) y febrero ( $22^{\circ}\text{C}$ ).

Los valores medios de temperatura mínima se puede observar que enero y diciembre son los meses más fríos con  $17.8$  y  $18^{\circ}\text{C}$  de temperatura mínima promedio respectivamente.

Los datos obtenidos de la variable analizada fueron procesados estadísticamente mediante el programa Statgraphics Plus 5.1, (2001) donde pudo comprobarse que los coeficientes de variación de la temperatura para cada uno de los meses del año no supera el 12 %. Esto garantiza una alta estabilidad del comportamiento del parámetro durante todo el periodo y la poca dispersión de los datos.

### Dirección y velocidad del viento.

El viento predominante en la zona es del Noreste y en ocasiones del nortenoeste y las mayores velocidades se presentan en los meses de enero, marzo y abril con valores

promedios de 19 y 19.5 km/h respectivamente y los menores valores se encuentran desde los meses junio hasta septiembre (12-15.5 km/h).

Estos reportes se deben, pues en los meses de febrero a abril suelen presentarse bajas presiones en el golfo de México y el sur de EEUU, situación que provoca varios días con vientos del sur muy fuertes.

**Análisis de las sustancias peligrosas que pueden provocar posibles accidentes en la zona de estudio.**

La caracterización de las sustancias involucradas en el proceso permitió obtener el grado de peligro que las mismas poseen.

**Tabla 2.** Nivel de peligro asociado a las sustancias involucradas en el proceso.

<b>Sustancias</b>	<b>Frases de riesgo</b>	<b>Peligro</b>
Propano	R2/R3/R5/R7/R10/R12/R13/R26/R36/R44	Medio
Diésel	R2/R3/R7/R10/R22/R25/R44/R52/R54/R55/R56/	Medio
Hidrógeno	R12	Alto

Como se aprecia en la tabla 2 la sustancia hidrógeno es la única con grado de peligro alto, mientras que el propano y diésel presentan grado medio, no obstante se analizarán los riesgos para cada una.

**Tabla 3.** Matriz resumen de la toxicidad de las sustancias.

Sustancia	Toxicidad								Total de efectos de la sustancia
	TA	I	S	TDR	M	C	Co	TPR	
Propano	X	O,R							2
Diésel	X	O,P,R	X						3
Hidrógeno	X	R,P	X				X		4
Total de sustancia con el efecto	3	3	2				1		

T A = Toxicidad Aguda, I= Irritación, S= Sensibilización, TDR= Toxicidad por dosis repetida, M= Mutagenicidad, C= Carcinogenicidad, Co= Corrosividad, TPR= Toxicidad para la reproducción.

**Nota:** En el caso de la irritación se aclara si es a los ojos (O), piel (P) o respiratoria (R).

Como se puede observar en la tabla 3, el hidrógeno es la sustancia que presenta más efectos, aunque no es denominada una sustancia tóxica, según lo reportado por Servicio de Protección, (2002).

Los efectos que más predominan de las sustancias analizadas son: la toxicidad aguda e irritación.

### **Resultados de la aplicación del software ALOHA.**

Para esta investigación se estimó el comportamiento de los cuatro compuestos, PROPANO, DIÉSEL e HIDRÓGENO para cada mes del año y la dirección del viento más ocurrente.

### **Análisis de los resultados de las áreas de la nube tóxica.**

Para el siguiente análisis se estimó el comportamiento de la nube tóxica, obteniéndose las diferentes áreas exteriores de peligro, así como, el comportamiento de dicha nube en áreas interiores ubicadas a diferentes longitudes de la fuente. Además se tuvieron en cuenta las consideraciones explicadas anteriormente.

**Tabla 4.** Resumen de las situaciones más peligrosas que se pudieran presentar ante posibles accidentes mayores.

Sustancia Tóxica	Concentración Máxima alcanzada en Exteriores(ppm)		Sobrepresión (psi)	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	
	Escenario 1 Nube tóxica de vapor	Escenario 2 Área inflamable de una nube de vapor	Escenario 3 Área de explosión de nube de vapor	Escenario 4 <i>Jet Fire</i>	Escenario 5 <i>Bleve</i>
<b>PROPANO</b>	2 100	-	-	10,7	10.9
Mes más agresivo	Febrero	-	-	Agosto	Septiembre
Distancia(m)	80	-	-	23,4	100
<b>DIESEL</b>	1 000	4 800	-	10,7	10.4
Mes más agresivo	Septiembre	Enero, octubre, noviembre y diciembre	-	Agosto	Septiembre
Distancia(m)	130	55	-	60	610
<b>HIDRÓGENO</b>	-	24 000	14,6	-	10.2
Mes más agresivo	-	Febrero y diciembre	Agosto	-	Febrero
Distancia(m)	-	20	24,3	-	72.2

Se mostró el área de atmósfera peligrosa para la dirección del viento nordeste, que se corresponde con la de mayor frecuencia en esta región y el mes de septiembre que posee la más baja velocidad del viento, lo que garantiza la mayor estabilidad atmosférica.

**Análisis de la influencia de la radiación térmica y la sobrepresión provocada por un *Bleve*, un *Jet Fire* una explosión de una nube de vapor sobre las personas y la planta.**

Tanto el *Bleve*, el *Jet Fire* y la explosión de una nube de vapor provocan sobre las personas y las edificaciones un impacto no deseado.

La magnitud de esta afectación se estudia en este trabajo a partir de las ecuaciones Probit y los resultados históricos obtenidos por Wells, (2003) en sus investigaciones. A continuación aparecen los análisis para cada sustancia.

**Tabla 5:** % de muertes probables por efecto de la radiación térmica generada por un *Jet Fire* para el PROPANO.

<b>Distancia (m)</b>	<b>Radiación (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Probit Y</b>	<b>% Muertes</b>
10	12 300	3,344006641	5
20	3 520	-0,81978153	0

Los resultados de esta tabla muestra que el 5% de las personas que se encuentran menos de 10 metros de la fuente de ignición mueren y que a partir de los 20 metros el porcentaje de personas que perderían la vida es nulo.

Si tenemos en cuenta que el análisis es realizado para una sola bala, que la distancia entre cada bala es de 0,15 metros y existen almacenadas aproximadamente 22 balas, aumentaría en gran medida el % de muertes y provocaría un nuevo escenario denominado *Bleve* y por consecuencia al fenómeno llamado "efecto dominó", pues según Khan y Abbasi, (1998) existen tres causas que empiecen tal suceso como: sobrepresión, la radiación y la liberación tóxica.

Si observamos en la tabla siguiente, la longitud que se encuentra entre los edificios y la estación de la sustancia investigada es muy pequeña, esto provoca que gran parte del personal de la planta quedara expuesta.

**Tabla 6.** Distancia entre la estación de las sustancias y los edificios.

<b>Sustancia</b>	<b>Edificios</b>
Estación de propano	10 m
Estación de H <sub>2</sub>	35 m
Diésel	115 m

En la siguiente tabla se presenta el % de muertes para el compuesto DIÉSEL.

**Tabla 7:** % de muertes probables por efecto de la radiación térmica generada por un *Jet Fire* para el DIÉSEL.

<b>Distancia (m)</b>	<b>Radiación (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Probit Y</b>	<b>% Muertes</b>
20	36 700	6,982101336	98
40	9 600	2,519207887	10,1
60	3 660	-0,68998235	0

En la anterior tabla se muestra que el 98% de las personas que se hallan menos de 20 metros de la fuente de ignición mueren, el 10% a partir de los 40 metros y más de 60 metros no existen muertes.

#### **Análisis de los efectos de la radiación térmica provocada por un**

#### ***Bleve* sobre las personas.**

En este escenario se realiza un análisis análogo al antepuesto, en las posteriores tablas se exponen los resultados.

**Tabla 8.** % de muertes probables por efecto de la radiación térmica generada por un *Bleve* para el PROPANO.

<b>Distancia (m)</b>	<b>Radiación (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Probit Y</b>	<b>% Muertes</b>
20	58 600	8,539465366	100
40	17 300	4,479211532	30
60	8 040	1,929040284	<1
80	4 400	-0,88663026	0

En comparación con el anterior, el *Bleve* adquiere un impacto mayor, se puede observar que el 100% de las personas que se encuentran menos de 20 metros de la fuente de ignición mueren, el 30% a partir de los 40 metros, más de 60 metros menos del 1% y más de 80 metros no existen muertes.

Como podemos apreciar en la tabla 3.4 muestra que la distancia entre los edificios y la estación es de 10 metros, quiere decir que parte de los trabajadores presentes en la edificación y equipos cercanos serían afectados gravemente.

Cerca de la estación existen también tuberías de petróleo crudo, agua y vapor que son dirigidos a la sala de caldera, si ocurriera este fenómeno se desataría un desastre mayor al ya existente.

Los resultados de la siguiente tabla son impresionantes, pues se lo explicaremos con más detalles.

Como se puede apreciar en la tabla 9 este escenario posee un enorme impacto, pues a menos de 200 metros el % de muertes es el máximo y menos de 400 metros más de la mitad de los trabajadores, al analizar la tabla 9 se afecta tanto las edificaciones como las personas a esa distancia, ambas no solo son perjudicadas, también el área de caldera que se encuentra a unos 200 metros de la fuente.

**Tabla 9.** % de muertes probables por efecto de la radiación térmica generada por un *Bleve* para el DIÉSEL.

<b>Distancia (m)</b>	<b>Radiación (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Probit Y</b>	<b>% Muertes</b>
200	61 000	8,673048515	100
400	21 600	5,217983647	58
600	9 770	2,577625495	<1
800	5 380	0,592047205	<1
1000	3 450	-0,88663026	0

**Tabla 10.** % de muertes probables por efecto de la radiación térmica generada por un *Bleve* para el HIDRÓGENO.

<b>Distancia (m)</b>	<b>Radiación (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Probit Y</b>	<b>% Muertes</b>
20	32 500	6,577627313	94
40	7 850	1,849449329	<1
60	3 440	-0,89629064	0

En la anterior tabla se muestra que el 94% de las personas que se hallan menos de 20 metros de la fuente de ignición mueren y menos de 1% a partir de los 40 metros. Los datos demostrados en la tabla 3.4 muestran la no existencia de muertes dentro de los edificios.

### **Análisis del efecto de la sobrepresión provocada por una explosión sobre las personas y la planta.**

Por la importancia de este escenario se investigó el efecto de la explosión de una nube de vapor, obteniéndose los resultados siguientes.

**Tabla 11:** % de muertes por efecto de la sobrepresión generada por la explosión de una nube de vapor para el PROPANO.

<b>Distancia (m)</b>	<b>Sobrepresión (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Probit Y</b>	<b>% Muertes</b>
20	43 850,80	-3,2421316	0

La sobrepresión generada al explotar la nube de vapor, según la ecuación

Probit, no afectaría a las personas, este resultado coincide con los reportados por Wells, (2003) que asegura que incluso en balas de almacenamiento del gas, de menos de una tonelada de capacidad, los daños a las vidas humanas por efecto de la sobrepresión no sobrepasa al uno por ciento.

**Tabla 12:** Gradiente de sobrepresión generado por la explosión de una nube de vapor para el propano.

<b>Distancia (m)</b>	<b>Sobrepresión (psi)</b>
10	6,33
15	5,74
20	2,86
25	2
30	1,38
35	1,07
40	0,88

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 12 se alcanza una máxima sobrepresión de 6.33 psi, de distancia hasta 10 metros, significa que a esta distancia se debe esperar la destrucción completa de las estructuras, lo que incluye la rotura de las balas de almacenamiento de dicho compuesto, pues las mismas no resistirían más de 4 psi.

Este accidente tendría un efecto mayor, ya que alcanzaría a destruir otras instalaciones cercanas de la estación como las oficinas que se encuentran apenas 10 metros. De 15 a 40 metros los daños podrían ser: colapso parcial de las paredes y los techos y daños estructurales menores como rotura de ventanas, rotura de losas y cruídos de los techos y las paredes.

En la posterior tabla demostramos los efectos de la sobrepresión para la sustancia HIDRÓGENO.

**Tabla 13:** % de muertes por efecto de la sobrepresión generada por la explosión de una nube de vapor.

<b>Distancia (m)</b>	<b>Sobrepresión (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Probit Y</b>	<b>% Muertes</b>
20	2 020 170,59	23,22416529	100
30	17 581,69	-14,8821231	0

Los resultados de esta tabla muestra que el 100% de las personas que se encuentran menos de 20 metros de la fuente de ignición mueren y que a partir de los 30 metros el por ciento de personas que perderían la vida es nulo.

**Tabla 14:** Gradiente de sobrepresión generado por la explosión de una nube de vapor.

<b>Distancia (m)</b>	<b>Sobrepresión (psi)</b>
10	293
15	293
20	293
25	9,80
30	2,68
35	1,56
40	1,18

En la tabla 14 demuestra que desde 10 hasta 25 metros se espera la destrucción total, es decir el 100% de los daños según lo reportado por Wells, (2003).

Este accidente tendría un efecto mayor, ya que alcanzaría a destruir otras instalaciones cercanas de la estación como la estación de CO<sub>2</sub> que se encuentra a penas 2 metros. De 30 a 40 metros los daños provocados por el efecto de la sobrepresión podrían ser: colapso parcial de las paredes y los techos y 40% de daños en las estructuras.

### **Análisis de los efectos de la radiación térmica sobre las personas provocado por un Jet Fire.**

Obtenidos los resultados de la radiación a partir del *software* ALOHA para cada sustancia, se obtuvo los % de muertes provocados por cada escenario con la ayuda de las ecuaciones Probit, tales ecuaciones se programaron en *Microsoft Excel*. Se consideró las mismas condiciones meteorológicas como en los epígrafes anteriores.

### **Conclusiones parciales**

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis histórico de accidentes, el compuesto con mayor frecuencia (0,1518 veces /años) es el propano. Los escenarios de mayores áreas de atmósferas peligrosas son la nube tóxica y el *Bleve*. Mediante las ecuaciones Probit se determinó que el mayor número de muertes se puede producir bajo los efectos de un *Bleve*. La explosión de una nube de vapor de propano e hidrógeno, provocan graves afectaciones a las edificaciones de la planta.

### **Bibliografía**

Acosta, G. (2008). "Evaluación de riesgos en la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro". Tesis en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos. Cuba.

Acosta, G. (2012). "Evaluación de Atmósferas Peligrosas en la Planta Energas S.A, Varadero". Tesis en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.

Bosch, C.J.H. van den, Weterings, R. (2006). *Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases)*. Yellow Book. The Hague.

Casal, et al. (2001), "Análisis del Riesgo en Instalaciones Industriales", Alfa omega S.A., Bogotá (Colombia), ISBN: 958-682-287-7.

Castro, D. (2014). Evaluación de áreas de atmósferas peligrosas en la Zona Industrial de Matanzas. Tesis en opción al título de Máster en Ingeniería Química. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos. Cuba.

Correa, A. D (2004). Manual de Seguridad y Salud Ocupacional. Transportación segura de sustancias peligrosas., MINBAS, La Habana.

Creus, Antonio. (1997). "Instrumentación industrial". Sexta Edición. España.

Duarte, G. (2009). SIAFASRL. SIAFASRL. [En línea] 2009. [Citado el: 30 de enero de 2011.] <http://natlaw.com/interam/ar/eg/rg/rgareg11.htm>.

Duffus, J.H, Worth, G.J. (1996). *Fundamental Toxicology for Chemists*. Royal Society of Chemistry, Londres.

Galán, (2002). Manual del sistema de prevención de riesgos laborales, Xixona.

González, J.F. (2014). Esp. en Pronóstico del tiempo. CITMA. Matanzas.

- Hernández, L. (2009). Evaluación de los riesgos en el sistema de Calentamiento de Aire Regenerativo de la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras” de Matanzas. Tesis en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos. Cuba.
- Irving, N. (2003). *Dangerous properties of industrial materials*.
- Joaquín. (1999). Ambiente y enfermedad., Científico - Técnico, La Habana.
- F.I. Khan, S.A. Abbasi, (1998). “Models for domino effect analysis in chemical process industries”. Proc. Safety Prog. 17 -107.
- Lessing P.A, (2003).Low Permeation Liner for HidrogenGas Estorage Tanks. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory (INEEL) and University of California at Los Angeles (UCLA), Los Angeles. UC. USA.
- López, 2010. Evaluación de áreas de atmósferas peligrosas en la Zona Industrial de Matanzas. Tesis en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos. Cuba.
- Manual de usuario del software ALOHA. (2007). Disponible en: www.fiqm.umcc.cu.*
- Morales, Y. C (2004). Manual de procedimientos de Seguridad Industrial. Protección a las instalaciones., La Habana.
- Moya, B. (2010). Esp. Principal Meteorología. CITMA. Matanzas.
- Nolan, Dennis P. (2011). *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities. Second edition. Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK.*
- Orozco, J. L (2007). Guía para la caracterización de las sustancias .Universidad de MatanzasCamilo Cienfuegos. Cuba.
- Oxtoby DW, Gillis HP, Nachtrieb NH, (2002). *Principles of Modern Chemistry* 5th ed. Thomson Brooks/Cole.
- R.H., P. 1997, Perry's Chemical Engineers Handbook, McGraw-Hill, Inc., New York (USA).
- Rodríguez, (2006) Análisis de Riesgos Industriales en la Planta de Tratamiento Químico de Agua de la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras” de Matanzas. Tesis en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos. Cuba.
- Soriano, B. Raúl (2010). Espec. Principal Meteorología. Aeropuerto Internacional. Juan Gualberto Gómez.
- Statgraphics Plus 5.1 (2001). *Disponible en: www.fiqm.umcc.cu.*
- Perera, M. (2006).Especialista Medio Ambiente. CITMA. Matanzas.
- PNUMA/IPCS, 1999. "Evaluación de riesgos químicos". *PNUMA/IPCS. ONU.*
- Wells, Geoff. (1997). Majors Hazards and their management. Gulf Publishing Company. Houston, Texas.*
- Vílchez, J. et. al 2001 Análisis de riesgos ambientales y aplicación al diseño de instalaciones industriales.