



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Tesis

**Simulación de riesgos ocasionados por
Incendios y Explosiones**



Que para obtener el título de:

Ingeniera en Computación

Presenta:

Carmen Jazmín González Hernández



Asesor: M.C. Vicente Fuentes Gea

México, Ciudad Universitaria 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos:

A tí Mamá:

Por ser la responsable de hacerme creer que todo se puede lograr en esta vida cuando se desea de verdad. Por darme el primer impulso para llegar a ser lo que ahora soy, por ser mi ejemplo y cuidar todos mis pasos. Por partirme en mil pedazos para llenar todos los espacios de mi vida... ¡Gracias Mamá! ¡Te quiero con toda el alma!

A un ser muy especial:

Quien se convirtió en mi ángel guardián: a ti David por ser parte fundamental para que pudiera terminar este sueño. Por estar conmigo en las buenas y en las malas... ¡Gracias por todo!

A mí pequeño hermano Rodrigo:

Por dar alegría a mi vida y tenerme paciencia aún cuando parezca que estoy ausente. Sé que lograrás todo lo que te propongas, nunca dejes de soñar...

A mí familia:

Por darme las herramientas para que nunca desistiera:

- Tío Jesús por ser mi amigo y apoyarme en los momentos difíciles.
- Tío Roberto por creer en mí y hacerme sentir que podía llegar tan alto, sin tu apoyo no sé qué hubiera hecho...
- Tía Paulina por ser como mi segunda Mamá, por estar a mi lado cuando lo necesité.
- Tía Patricia por acortar las distancias para darme ánimos y nunca dejarme caer.

A mis amigos:

Que estuvieron a mi lado cuando más los necesitaba y a todos aquellos que han tenido una participación activa en mi vida... ¡Gracias!

A mi querida UNAM:

Facultad de Ingeniería y profesores que me dieron los conocimientos necesarios para desarrollarme plenamente. Gracias Vicente Fuentes por tenerme la paciencia necesaria para llegar hasta el final.

A mi amado abuelito Venustiano:

Muy especialmente te dedico esta tesis, a ti que hoy me miras desde el cielo. Te agradezco el orgullo que sentías por mí, no te defraudaré... Sé que estarás conmigo toda la vida ya que nunca olvidaré todo lo que me enseñaste, nunca olvidaré tu hermosa sonrisa... Un beso donde quiera que estés "Abue"... ¡Te quiero muchísimo! ¡Gracias por ser mi guía!

Índice

Introducción	I
Capítulo 1. Riesgos químicos: Incendios y Explosiones	
1.1 Conceptos generales	1
1.2 Identificación de Fuentes Mayores de Amenaza y Riesgo	2
1.3 Estimación de daños y consecuencias	3
1.4 Concepto de Incendio y los criterios para evaluar los daños que ocasiona	6
1.5 Tipos de incendios	8
1.6 Concepto de Explosión y los criterios para evaluar los daños que ocasiona	12
1.7 Tipos de explosiones	13
Capítulo 2. ARCHIE	
2.1 ¿Qué es ARCHIE y cómo funciona?	17
2.2 Introducción al método utilizado por ARCHIE	19
2.3 Procedimientos para el análisis de consecuencias por incendios y evaluación de su impacto	21
2.4 Procedimientos para el análisis de consecuencias por explosiones y evaluación de su impacto	25
Capítulo 3. Sistema de Análisis de Consecuencias generadas por Incendios y Explosiones (SACIE).	
3.1 Objetivo de SACIE	33
3.2 Diseño estructural	35
3.3 Desarrollo de SACIE	48
3.4 Pruebas aplicadas a SACIE	70
3.5 Operación y crecimiento futuro	75

Capítulo 4. Resultados.	
4.1 Escenarios generados por SACIE	76
4.2 Comparación de los resultados obtenidos en las pruebas aplicadas a SACIE con los generados por ARCHIE	89
Conclusiones	93
Anexos.	
A.1 Método de la Secante para solución de ecuaciones	96
A.2 Ejemplos de Aplicación de Métodos Numéricos.....	99
Abreviaturas y siglas	104
Bibliografía.....	105

Índice de Tablas:

Tabla 1.1 Criterios de daños por quemaduras debidas a la radiación térmica.
Tabla 1.2 Daños esperados por la sobre presión en una explosión.
Tabla 2.1 Factor de rendimiento para vapores explosivos y gases.
Tabla 3.1 Descripción de las páginas de SACIE.
Tabla 3.2 Descripción de las tablas principales de atom.
Tabla 3.3 Descripción de las Tablas restantes de atom.
Tabla 3.4 Puntos para las rectas que conforma a la curva “Uno”.
Tabla 3.5 Datos tabulares de la gráfica de Distancia vs Presión adimensional.
Tabla 3.6 Clasificación de Zonas de riesgo por nivel de daño.

Índice de Figuras:

Figura 2.1 Sobre presiones P_s versus distancias adimensionales R .
Figura 3.1 Diseño gráfico de SACIE.
Figura 3.2 Modelo de Explosión no confinada de una nube de vapor.
Figura 3.3 Gráfica con las 5 zonas de daños.

- Figura 3.4 Gráfica con 4 zonas de daños.
- Figura 3.5 Modelo de explosión por sobre presión en un contenedor.
- Figura 3.6 Gráfica de distancia vs sobre presión.
- Figura 3.7 Modelo de radiación por bolas de fuego.
- Figura 3.8 Acceso al módulo de administración.
- Figura 3.9 Módulo de administración.
- Figura 3.10 Módulo de medidas de seguridad.
- Figura 3.11 Mensaje de advertencia sobre un dato equivocado.
- Figura 3.12 Mensaje que advierte que se están enviando campos en blanco.
- Figura 3.13 Simulación de una explosión no confinada de una nube de vapor.
- Figura 3.14 Vista de la tabla datos_expnc con el dato recién insertado.
- Figura 3.15 Nueva Simulación de la explosión no confinada de una nube de vapor.
- Figura 3.16 Vista de la tabla datos_expnc con el dato modificado.
- Figura 4.1 Resultados del modelo de explosión no confinada de una nube de vapor.
- Figura 4.2 Resultados del modelo de explosión por sobre presión en un contenedor.
- Figura 4.3 Mensaje que avisa cuál es la distancia máxima.
- Figura 4.4 Mensaje que avisa cuál es la distancia mínima.
- Figura 4.5 Pantalla de extrapolación.
- Figura 4.6 Resultados del modelo de radiación térmica por bolas de fuego.
- Figura 4.7 Mensaje de usuario no registrado.
- Figura 4.8 Formulario para agregar una sustancia peligrosa.
- Figura 4.9 Mensaje de inserción exitosa.
- Figura 4.10 Selección para actualizar la información de una sustancia peligrosa.
- Figura 4.11 Información para actualizar una sustancia peligrosa.
- Figura 4.12 Mensaje de actualización exitosa.
- Figura 4.13 Eliminar una sustancia peligrosa de SACIE.

Figura 4.14 Mensaje de eliminación exitosa.

Figura 4.15 Hoja MSDS del Acetaldehído.

Figura 4.16 Documento PDF del Acetaldehído.

Figura 4.17 Menú de ARCHIE.

Figura 4.18 Solicitud del peso del material peligroso.

Figura 4.19 Resultados del modelo de explosión no confinada de una nube de vapor.

Figura 4.20 Resultados del modelo de radiación térmica por bolas de fuego.

Índice de Diagramas

Diagrama 3.1 Modelo entidad-relación de atom.

Diagrama 3.2 Funcionamiento general de SACIE.

Diagrama 3.3 Proceso de cálculo y resultados.

Diagrama 3.4 Modelo de explosión no confinada de una nube de vapor.

Diagrama 3.5.1 Modelo de explosión por sobre presión en un contenedor.

Diagrama 3.5.2 Modelo de explosión por sobre presión en un contenedor.

Diagrama 3.6 Modelo de radiación térmica por bolas de fuego.

Diagrama 3.7 Módulo de administración.

Diagrama 3.8 Módulo de medidas de seguridad para el manejo de sustancias peligrosas.

Introducción

Con el crecimiento de la población en el mundo, se ha incrementado también el número de servicios indispensables para satisfacer las necesidades de la población y por lo tanto, los diferentes tipos de industrias, así como las actividades relacionadas con el manejo, almacenamiento, transporte y disposición de sustancias químicas consideradas como peligrosas. Dichas sustancias son utilizadas en diversos negocios como lo son tortillerías, centros comerciales, tlapalerías, fábricas o sistemas de transporte, lo que pone en riesgo a la población cercana a ellos, ya que puede sufrir lesiones, intoxicación, invalidez o muerte por incendios, explosiones, fugas o derrames.

Los accidentes en los que se involucran sustancias químicas pueden generarse a partir de fenómenos naturales como huracanes, sismos e inundaciones entre otros, o por fenómenos antropogénicos como errores humanos, errores administrativos, fallas operativas en los procesos industriales, terrorismo o sabotaje.

Por ello es necesario contar con una herramienta que provea de la información necesaria para minimizar al máximo las consecuencias que se generan de este tipo de eventos. En el mercado existen herramientas que permiten la simulación de riesgos causados por incendios y explosiones, sin embargo, la mayoría de ellas tienen un precio elevado por lo que no muchas empresas y/o personas pueden acceder a ellos. También hay programas gratuitos como lo son ARCHIE y ALOHA, sin embargo estos tienen algunas carencias visuales.

El objetivo de esta tesis es desarrollar un Sistema para el análisis de incendios y explosiones que combine las características de las herramientas comerciales con las de las gratuitas y que sea capaz de proveer escenarios gráficos fáciles de comprender, de modo que permitan el desarrollo de planes de contingencia.

Como primera parte de esta tesis, se explican los conceptos básicos para el manejo de accidentes causados por fenómenos químicos, sus tipos y los elementos que se involucran en ellos.

También se estudia el procedimiento matemático que realiza el programa *Automated Resource Chemical Hazard Incident Evaluation*, ARCHIE, para la simulación de consecuencias y daños ocasionados por incendios y explosiones así como sus efectos en inmuebles y personas.

Posteriormente se detalla el procedimiento que se siguió para llevar a cabo la reproducción de ARCHIE con mejoras visuales y de uso, las cuales constituyen la mejora más importante que se le realizó a ARCHIE, ya que éste programa fue diseñado para trabajar en el ambiente MS-DOS y por lo tanto, no contiene un ambiente amigable que facilite su operación por parte de los usuarios finales.

Así pues, a continuación se describen las etapas que se siguieron para el desarrollo del *Sistema de Análisis de Consecuencias generadas por Incendios y Explosiones: SACIE*, el cual es capaz de proporcionar al usuario escenarios gráficos fáciles de comprender y a partir de éstos realizar planes de contingencia si se llegara a presentar algún incendio o explosión.

Como parte de los resultados de esta tesis, se hicieron pruebas con SACIE y se compararon los escenarios generados con los realizados por ARCHIE. Esto con la finalidad de asegurar que SACIE funciona adecuadamente, así como demostrar que es un Sistema confiable y de fácil manejo.

Capítulo 1. Riesgos químicos: Incendios y Explosiones.

Riesgos Químicos

En el estudio de riesgos químicos es necesario definir los conceptos que se presentan a continuación, ya que su significado puede variar dependiendo del fenómeno natural o antropogénico que origina un accidente (Documentación de ARCHIE).

1.1 Conceptos generales.

Accidente. Evento o secuencia de eventos, no planeados, que tienen una consecuencia no deseable.

Consecuencia. Es el resultado de un accidente. Involucra los efectos a la salud, al ambiente y las pérdidas económicas relacionadas con una fuga, derrame, explosión o incendio.

Peligro. Característica propia del sistema en estudio (planta, proceso, actividad, situación) que tiene la potencialidad de causar un accidente. En este caso implica la presencia de materiales peligrosos, su relación con el ambiente que lo rodea y la presencia de eventos no deseados que pueden causar un accidente.

Riesgo. La exposición involuntaria a un peligro, como lo es por ejemplo la exposición a sustancias tóxicas presentes en el medio ambiente, en el aire que se respira o en el agua y alimentos ingeridos, pueden causar un riesgo para la salud de los seres humanos. Los efectos negativos de una exposición de este tipo dependerán de la toxicidad de la sustancia, de la dosis, y del tiempo y frecuencia de la exposición. El

riesgo se expresa a menudo en términos cuantitativos de probabilidad. (USEPA, 2001).

Efecto Domino. Es uno de los posibles efectos de un accidente relacionado con materiales peligrosos. Un accidente que se produjo en una unidad puede causar un segundo accidente en una unidad cercana que a su vez puede originar un tercer accidente. Los eventos primarios que desencadenan un efecto domino son fuego, explosiones, ondas de choque, proyecciones e impactos simultáneos e interactivos de fuego y explosión.

1.2 Identificación de fuentes mayores de amenaza y riesgo.

Existen elementos importantes que deben considerarse para el estudio de riesgos químicos, como son: población, zonas vulnerables, industrias, comercios, recursos para la atención de emergencias, así como de las áreas de afectación para los diferentes escenarios que pueden presentarse como almacenamiento, manejo, transporte y distribución de sustancias químicas peligrosas.

Lo primero es identificar las actividades que se relacionan con el manejo de sustancias, materiales y/o residuos peligrosos, las instalaciones industriales y de servicios, tuberías o gasoductos. Asimismo, se deben de identificar las vías terrestres y fluviales en las que comúnmente se realiza el transporte de dichos materiales.

Derivado de esta investigación, se obtiene la siguiente información:

- Tipo y cantidad de sustancias químicas peligrosas que se manejan en la zona.
- Localización e identificación de las instalaciones industriales que manejan sustancias químicas peligrosas.

- Propiedades físicas y químicas de las sustancias peligrosas.
- Condiciones de almacenamiento y los sistemas de seguridad.
- Rutas de transporte y distribución.
- Longitud y diámetro de las tuberías que transportan las sustancias.

Es muy importante la identificación de todos estos factores en las industrias que manejan materiales peligrosos, ya que comúnmente manejan grandes volúmenes. También el traslado de dichos materiales es un factor importante, ya que representan un gran riesgo para el ambiente que los rodea durante el recorrido.

1.3 Estimación de daños y consecuencias

Cuando un accidente químico ocurre, se realiza la estimación de daños a través de un análisis de consecuencias y de la suma del total de los daños que se generan a partir de dicho fenómeno.

Actualmente existen varios procedimientos para efectuar el análisis de consecuencias derivado de derrames de líquidos, fugas de gases tóxicos, incendios y explosiones. Muchos de estos procedimientos han sido implementados en programas de computadora que pueden obtenerse de Internet, los cuáles tienen una gran aceptación por parte de autoridades encargadas de administrar desastres de origen químico.

Entre los programas que pueden obtenerse gratuitamente de Internet se encuentran: ALOHA que utiliza la herramienta de consulta sobre sustancias químicas CAMEO y un graficador MARPLOT 3.3, y ARCHIE. Además existe software gráfico avanzado como SUPERCHEMS™, el cual tiene un costo muy elevado.

El Sistema derivado de esta tesis, reproduce algunos de los procedimientos que ejecuta **ARCHIE** (*Automated Resource for Chemical Hazard Incident Evaluation*), el cual es un programa de computadora que realiza el procedimiento de análisis de consecuencias para incendios y explosiones. Por ello, vale la pena mencionar brevemente en qué consiste cada uno de estos programas, ARCHIE es descrito detalladamente en el capítulo 2.

ALOHA. Cuyas siglas significan *Areal Locations of Hazardous Atmospheres*. Es un programa desarrollado por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y la EPA (U.S. Environmental Protection Agency). ALOHA fue diseñado para responder rápidamente a eventos peligrosos en los que están envueltas sustancias químicas. Es una herramienta para la planeación y entrenamiento en caso de dispersión de gases tóxicos, incendios y/o explosiones (Documentación de ALOHA).

El programa es capaz de evaluar el impacto que tienen accidentes en los que se involucran derrames de materiales tóxicos procedentes tanto de tanques de almacenamiento como de tuberías, además de fugas de gases tóxicos a la atmósfera. Permite definir zonas de afectación y de exclusión para diferentes escenarios.

Otra característica importante de señalar de ALOHA y que está ausente en otros programas similares como ARCHIE, es que cuenta con una base de datos de aproximadamente 1,000 compuestos químicos peligrosos con sus propiedades. Esta base de datos puede ser editada y ampliada de acuerdo a las necesidades del usuario.

En ALOHA, la predicción de resultados para los diferentes escenarios, se basa en la información contenida en su base de datos y en la suministrada por el usuario. Dicha información incluye las dimensiones de tanques de almacenamiento, tuberías, diques y cantidades de materiales almacenados y sus características químicas y físicas, así

como condiciones meteorológicas prevalecientes. Otra característica importante a destacar es que la estimación de emisiones a la atmósfera, las cuales abarcan un periodo máximo de una hora, puede incluir cantidades variables en el tiempo que son promediadas y que alimentan a uno de los dos módulos que conforman al programa que realiza los cálculos de dispersión. Uno de estos módulos es un modelo gaussiano que permite predecir el campo de concentraciones en la atmósfera generado por materiales con densidades similares a las del aire. El otro, está dirigido a gases pesados, el cual es una versión simplificada de DEGADIS. Éste permite modelar el comportamiento de gases de densidad mayor a la del aire. Ambos modelos generan gráficas de concentraciones y dosis en receptores que el usuario puede previamente definir.

ALOHA es un programa gráfico y de fácil uso para aquellos que tienen conocimientos amplios en el manejo de accidentes químicos, sin embargo, no lo es tanto para personas que no están relacionados con estos eventos. Otra de las desventajas que presenta este programa, es que sólo está disponible en inglés y que predice eventos sólo para zonas ubicadas en Estados Unidos, sin mencionar que no publica la documentación de la metodología que usa para la evaluación de consecuencias.

CAMEO. *Computer-Aided Management of Emergency Operations.* CAMEO es una suite de programas que se utiliza para planear y responder a emergencias químicas. Este software trabaja de la mano con ALOHA y MARPLOT ya que todos ellos fueron desarrollados por la misma empresa (Documentación de CAMEO).

Este programa puede ser usado principalmente de dos maneras:

1. Para acceder, comparar y evaluar información necesaria para responder a emergencias en incidentes con materiales peligrosos. Está diseñado

para encontrar rápidamente justo la información que se necesita en una escena.

2. En el desarrollo de planes de emergencia para la comunidad en caso de accidentes con materiales peligrosos. Ayuda a encontrar los requerimientos necesarios para la planeación.

CAMEO también cuenta con una base de datos de sustancias químicas peligrosas. Depende de trabajar con ALOHA y MARPLOT para poder funcionar adecuadamente.

MARPLOT. *Mapping Application for Response, Planning, and Local Operational Tasks.* Es un programa de aplicación general que realiza trazos de zonas de daños. Se pueden crear y editar mapas rápidamente. Estos mapas corresponden a la zona geográfica de Estados Unidos.

SUPERCHEMSTM. Este software incluye algoritmos para el análisis de consecuencias estimadas para efectos radioactivos y efectos por explosiones, entre otros (Documentación de SUPERCHEMSTM). Además, tiene la capacidad de proporcionar resultados tanto en forma gráfica como en forma tabular. Sin embargo, la información sobre este programa es muy poca. Para poder utilizarlo, tiene que pagarse una cantidad de dinero considerable.

1.4 Concepto de Incendio y los criterios para evaluar los daños que ocasiona.

Incendio

Un incendio constituye un fuego no controlado de grandes proporciones, que puede presentarse de forma súbita, gradual o instantánea, al que le siguen: daños materiales,

posibles lesiones en personas o pérdidas de vidas humanas además de deterioro del ambiente.

Cuando se piensa en un incendio, muchas de las veces se visualizan edificios, vehículos de transporte o bosques quemándose, además de nubes de humo por el cielo. Estos son los más claros ejemplos de incendios y regularmente envuelven materiales combustibles ordinarios como papel, madera, algodón, plásticos y caucho. Sin embargo, cuando se involucran materiales peligrosos, estos incendios pueden presentar características inusuales.

Criterios de daños que ocasiona un Incendio

La exposición prolongada a una fuente de calor intensa, como una flama, puede resultar muy perjudicial para los seres vivos. El fuego puede causar daño a distancia a personas por la radiación térmica, como lo hace el sol al calentar la Tierra. Así, entre más peligroso sea el material que provoca el incendio, más bienes inmuebles sufrirán daños y las personas tendrán lesiones más severas, no sólo en el área del incendio sino en toda la zona que lo rodee.

Los niveles de radiación térmica (también llamados flujos de radiación térmica), son medidos y expresados en unidades de energía por unidad de área. Sin embargo, estos daños están en función de la duración de la exposición así como del nivel, además debe tenerse cuidado con las dosificaciones de la radiación térmica. Estas dosificaciones son determinadas por la combinación de los niveles de radiación y el tiempo de exposición. Se expresan en unidades de energía por unidad de tiempo por unidad de área.

En la tabla 1.2 se listan algunos de los efectos que tiene la radiación térmica sobre la piel como función del tiempo y nivel de exposición.

kW/m^2	$Btu/h\ ft^2$	<i>Tiempo para daños severos (seg)</i>	<i>Tiempo para quemaduras de segundo grado (seg)</i>
1	300	115	663
2	600	45	187
3	1000	27	92
4	1300	18	57
5	1600	13	40
6	1900	11	30
8	2500	7	20
10	3200	5	14
12	3800	4	11

Fuente: Butter, K. *Effects of Extreme Heat and Cold on Human Skin, II. Surface Temperature; Pain and Heat Conductivity in Experiments with Radiant Heat.* J. Ap. Phys., Vol . 3, p. 703, 1951.

Tabla 1.1 Criterios de daños por quemaduras debidas a la radiación térmica

1.5 Tipos de Incendios

El propósito de los métodos que estudian los daños que puede ocasionar un incendio, es determinar la zona de influencia de la radiación térmica que se genera durante el evento asociado al manejo de sustancias peligrosas, considerando tanto exposiciones letales como exposiciones dañinas que pudieran provocar quemaduras de segundo

grado a la población expuesta. Este tipo de estimaciones pueden ser útiles para planear la cantidad de personas que deberán ser evacuadas en caso de un accidente y ubicar adecuadamente los contenedores que puedan involucrarse en un efecto domino.

Existen diversos tipos de incendios asociados con la descarga de materiales peligrosos, de los cuales los más importantes son:

- Bolas de fuego
- Chorros de fuego
- Charcos de fuego
- Nubes de vapores o polvos de fuego

1.5.1 Bolas de Fuego (BLEVE 'S)

La generación de una bola de fuego es uno de los accidentes más temibles por su impacto combinado de fuego y explosión. Generalmente ocurre cuando un tanque de almacenamiento que contiene sustancias explosivas o inflamables, se expone a altas temperaturas, particularmente a alguna fuente de fuego. El almacenamiento de gas LP en grandes recipientes constituye una fuente de riesgo importante que ejemplifica el potencial de ocurrencia de este tipo de eventos.

Aunque las bolas de fuego duran generalmente muy poco, la intensidad de la radiación térmica generada puede causar, en cuestión de segundos, severos daños a las personas que se encuentren a cerca del estallido. Además, si el tanque es relativamente grande y de forma cilíndrica, parte del cohete puede, literalmente, convertirse en un cohete, desprendiendo gases y líquidos mientras éstos se queman.

Este fenómeno puede presentarse con la mayoría de los líquidos muy calientes que se encuentran en contenedores cerrados o mal ventilados. Dos factores importantes que se toman en cuenta, son: la duración de la exposición externa al fuego y, si hubiese presente alguna tubería, la capacidad de presión del flujo en ella. La posibilidad de que un BLEVE ocurra, aumenta con la volatilidad del material peligroso.

La bola de fuego no ocurrirá si la duración de exposición al fuego no es lo suficientemente larga o si la tubería que contiene la sustancia peligrosa, expulsa el vapor tan rápido como éste se genera. Como medidas de prevención de este fenómeno puede considerarse la posibilidad de contar con sistemas de riego contra incendios o mangueras grandes para controlar el fuego externo así como enfriar el contenedor que se haya calentado.

1.5.2 Chorros de Fuego

El almacenamiento o el transporte de gases comprimidos licuados puede ocasionar, en el caso de una ruptura accidental del tanque de almacenamiento o de una tubería, la descarga de gases a altas velocidades que originan la formación de un chorro. Si el gas es inflamable y encuentra una fuente de ignición, se formará una flama a chorro cuya extensión puede ser considerable (del orden de decenas de metros). La radiación térmica que emana este tipo de fuego puede convertirse en una amenaza no sólo por el efecto directo que pudiera tener sobre la población expuesta al chorro, sino también por la posibilidad de que la flama alcance un tanque de almacenamiento de combustible y sea el detonador de otro incendio, una explosión y/o la fuga de gases tóxicos.

1.5.3 Charcos de Fuego

El derrame de estos combustibles, ya sea sobre el suelo o cuerpos de agua, puede formar un charco y posteriormente incendiarse. Una vez encendido el charco de combustible se formará una flama turbulenta de dimensiones tales que, debido a la exposición de la radiación térmica, puede ocasionar quemaduras letales en asentamientos cercanos a la zona del charco.

Una complicación adicional de este fenómeno es el desplazamiento del combustible líquido por las alcantarillas. Han existido casos donde el fuego ha encendido otros materiales de combustible en el área o han causado bolas de fuego en los contenedores que están en contacto directo con las llamas.

1.5.4 Nubes de vapores o polvos de fuego

Los vapores se forman a partir de charcos de líquidos volátiles o del gas que se escapa por las roturas de los contenedores. Si el vapor no se incendia inmediatamente, puede formar una nube de gas o de vapor que avanzarán en la dirección que lleve el viento. Si esta nube hace contacto con alguna fuente de ignición en un punto en el cual su concentración este dentro del rango de valores de su límite inferior o superior de inflamabilidad, un muro de fuego puede estallar hacia la fuente del gas o del vapor destruyendo todo lo que encuentre a su paso. Las personas o propiedades que se encuentren en la trayectoria de la nube o de la flama, pueden sufrir daños muy severos.

1.6 Concepto de Explosión y los criterios para evaluar los daños que ocasiona

Explosión

Una definición científica de explosión es:

“Se dice que ha ocurrido una explosión en la atmósfera, si la energía arrojada por ella es capaz de generar una onda de presión de amplitud finita que se desplace muy lejos a partir de la fuente en un lapso corto de tiempo y en un volumen pequeño. Esta energía se pudo haber almacenado originalmente en el sistema en varias formas: como energía nuclear, química o eléctrica. Sin embargo, este lanzamiento no se considera explosivo, a menos que sea lo bastante rápido y concentrado para producir una onda de presión que pueda ser escuchada por un humano. Aunque muchas explosiones causan daños a su alrededor, éstos no necesariamente son causados por el estallido.” (Baker. W. E., 1992).

Esta definición está enfocada a explosiones en el aire, ya que las explosiones perjudiciales pueden, por supuesto, ocurrir en cualquier otro medio. Así pues, una definición general de explosión es: “Una explosión es la liberación de una cantidad considerable de energía en un lapso de tiempo muy corto (pocos segundos), debido a un impacto fuerte o por la reacción química de ciertas sustancias.”

En función de la velocidad de combustión durante este fenómeno, se puede producir:

- Deflagración cuya velocidad de expansión es de 1 m/s
- Detonación cuya velocidad de expansión es mayor a 2,000 m/s

Criterios de daños que ocasiona una Explosión

Cuando un petardo o pedazo de dinamita explota, la violencia y velocidad de reacción que se produce se conoce como una onda expansiva u onda de ráfaga. Cualquier tipo de onda puede describirse como aire comprimido o gas caliente que se expande rápidamente en todas direcciones a partir del punto en que se inicia la explosión. Algunas ondas son capaces de moverse más rápido que la velocidad del sonido del aire, y, por lo tanto, pueden producir “bombas” de sonido, parecidas a las que produce un avión supersónico.

Los daños causados por estas ondas a objetos o personas, son una función compleja compuesta por varios factores. La fuerza de la onda se mide en unidades de presión (psia, Pa, atm, etc.), y los efectos de los picos de sobre presión dentro de la onda (la máxima presión dentro de ésta, es mayor que la presión atmosférica normal), se relacionan con el resultado de daños a edificios o lesiones a personas.

La tabla 1.3 muestra los valores los valores picos de sobre presión y los daños esperados en personas e inmuebles.

1.7 Tipos de explosiones.

Existen fundamentalmente dos clasificaciones de explosión que se asocian con el manejo de sustancias peligrosas:

- Explosiones de origen térmico y
- Explosiones motivadas por sobre presurización de un tanque de almacenamiento.

Sobre presión (psig)	Daño esperado
0.03	Rompimiento ocasional de ventanas grandes que ya se encontraban bajo tensión.
0.04	Ruido fuerte (143 dB); fisuras en vidrios causadas por las ondas expansivas.
0.1	Estallido de ventanas pequeñas que se encuentran sometidas a presión.
0.15	Valor común de presión que provoca daños en vidrios.
0.3	Algunos daños en paredes y techos de casas; 10% de los vidrios de las ventanas rotos.
0.4	Daños limitados en estructuras de menor importancia.
0.5 - 1	Comúnmente ventanas destrozadas; algunos daños en sus marcos.
0.7	Daños menores en las estructuras de casas.
1	Demolición parcial de casas; convirtiéndolas en inhabitables.
1 - 2	Fallas en estructuras metálicas y columnas, así como en paneles recubiertos de madera.
1 - 8	Extensión de lesiones de leves a serias. Laceraciones en la piel causadas por los vidrios que vuelan y otros proyectiles.
1.3	Marcos metálicos levemente torcidos en las estructuras de edificios.
2	Derrumbamientos parciales en muros y techos de casas.
2 - 3	Concreto no reforzado o polvo por bloques de muros destrozados.
2.3	Límite menor de daños estructurales serios.
2.4 - 12.2	De 1 a 90% de problemas en oídos en la población expuesta.
2.5	50% de destrucción en casas hechas de ladrillo.
3	Deformaciones en las estructuras de acero de edificios, arrancándolos de los cimientos.
3 - 4	Paneles y marcos de acero en edificios, arruinados.
4	Ruptura de las conexiones eléctricas en edificios.
5	Postes de madera arrancados.
5 - 7	Destrucción casi completa de casas.
7	Vagones de carga de trenes volcados.
7 - 8	Fallas en ladrillos no reforzados de 8 a 12 pulgadas causados por la flexión.
9	Vagones de carga de trenes demolidos.
10	Probable destrucción total de edificios.
15.5 - 29	De 1 a 99% de fatalidades en la población expuesta debido a los efectos directos de la explosión.

Fuente: Lees, F. P. *Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 1, Butterworths, London and Boston, 1980.

Tabla 1.2 Daños esperados por la sobre presión en una explosión.

Las primeras involucran la ignición y subsiguiente desprendimiento de energía térmica de materiales o mezclas explosivas. Las segundas son generalmente provocadas por el exceso de presión dentro de un contenedor de algún tipo, el cual se rompe violentamente.

La variable criterio para evaluar el impacto que tienen las explosiones, en contraste con la utilizada en los incendios en donde se utiliza la potencia de la energía incidente en la piel de las personas que están expuestas, es el valor pico de sobre presión de una onda de presión respecto de la presión atmosférica. Es importante notar que dichos valores de sobre presión decrecen rápidamente a medida que la onda se aleja de la fuente.

Los tipos de explosiones más comunes son las siguientes:

- Sobre presión de contenedores o tanques de almacenamiento
- Nubes Explosivas de polvos, gases y/o vapores
- Detonaciones en fases condensadas

1.7.1 Explosión por sobre presión en un contenedor

Es el resultado de una presión excesiva dentro de tanques sellados. Este evento se clasifica como una explosión no térmica.

Cuando el fenómeno se presenta, sucede algo similar a la ruptura de un balón cuando contiene demasiado aire, el tanque estalla completamente.

1.7.2 Explosión por nubes de polvo, gas o vapor

Estas nubes se encuentran dentro de su límite alto y bajo de explosividad y pueden causar una deflagración, explosión o detonación por la ignición. Este evento ocurre cuando una mezcla de combustible está confinada, o no completamente confinada, aunque definitivamente el confinamiento de la mezcla puede causar mayores daños en personas y bienes materiales. Las nubes pueden formarse directamente en ambientes vulnerables o pueden desarrollarse de la evaporación de los líquidos hirvientes que estén dentro del área.

1.7.3 Detonaciones en fases condensadas

Cuando la sustancia que explota o se detona es un líquido o sólido, el evento es llamado Explosión de fase condensada o Detonación.

Capítulo 2. ARCHIE.

2.1 ¿Qué es ARCHIE y cómo funciona?

ARCHIE surge con la incorporación de computadoras personales al estudio de consecuencias por accidentes químicos, con el fin de facilitar su estudio y reducir los costos que éste ocasionaba. Fue desarrollado por el Departamento de Transporte de Estados Unidos en asociación con FEMA y la EPA.

La primera versión de este programa fue la 1.0 y fue acompañada por una guía de uso. Para ese entonces se tenía pensado desarrollarlo en un ambiente más amigable y con procedimientos más sofisticados, dependiendo de la aceptación que tuviese entre el personal encargado de los estudios ambientales en el gobierno federal. Se planeaba añadirle una base de datos que contuviera las propiedades químicas y físicas de la mayoría de los materiales peligrosos, así como una versión que fuera compatible con computadoras Apple™ Macintosh, sin embargo hasta ahora este programa no ha sido mejorado.

Propósito y Objetivo de ARCHIE

El principal propósito de ARCHIE es proveer de información para la preparación de planes de emergencia con la ayuda de distintos métodos que evalúan el impacto ocasionado por una explosión y el asociado con las descargas episódicas de materiales peligrosos en la tierra (Documentación de ARCHIE). Este programa se diseñó para ayudar a comprender mejor la naturaleza de la secuencia de eventos que pueden desencadenarse a partir de un accidente así como sus consecuencias.

Características generales de ARCHIE

El programa incluye la capacidad de evaluar el impacto generado por incendios provenientes de líquidos derramados, chorros de hidrocarburos, bolas de fuego y explosiones provenientes de tanques sobre presurizados, nubes y condensados de vapores. ARCHIE no cuenta con una base de datos con información respecto a las características físico-químicas de posibles sustancias involucradas en accidentes. El usuario debe facilitar los datos de entrada para elaborar los escenarios que se desea considerar, incluyendo las propiedades químicas y físicas de los materiales peligrosos. También es importante destacar que las emisiones de vapores tóxicos que simula ARCHIE son independientes del tiempo. El módulo de dispersión que contiene este programa considera que la emisión de vapores tóxicos a la atmósfera tiene una duración finita, permitiendo simular este tipo de emisiones de manera apropiada. Por otra parte, la información que proporciona el programa como datos de salida, consiste en una serie de tablas conteniendo concentraciones y puntos receptores, zonas de evacuación y tiempos de arribo y salidas de la nube tóxica.

Entre los procedimientos que incluye esta versión de ARCHIE, están:

- Nueve métodos para estimar el índice de la descarga y la duración de un gas o lanzamiento líquido de un tanque o de una tubería.
- Siete métodos para ayudar al usuario a estimar el tamaño de cualquier charco de líquido que pueda formarse en la tierra.
- Dos métodos para estimar el tiempo en el cual un charco de líquido se evaporará y la duración de estos fenómenos hasta el momento en que el charco se agote.
- Un método para estimar el radio de la zona de peligro por la expansión de un gas tóxico o de un vapor en la atmósfera, la cual puede requerir la evacuación de la población expuesta.

- Un método para evaluar la radiación térmica que resulta de la ignición de un charco inflamable o de un combustible líquido.
- Dos métodos para evaluar el tamaño del área que puede estar expuesta a las concentraciones de gas o vapor inflamable.
- Un método para evaluar las consecuencias de una explosión no confinada de una nube de vapor, si el gas o el vapor inflamable presente en el aire estalla por ignición. .
- Un método para evaluar las consecuencias de una explosión que se presenta por la sobre presurización interna de un tanque sellado o inadecuado, debido a al calentamiento externo o a una reacción interna.
- Un método para evaluar las consecuencias por una explosión causada por la ignición de un material explosivo en el estado sólido o líquido.

2.2 Introducción al método utilizado por ARCHIE.

ARCHIE trabaja en un ambiente de MS-DOS. Al realizar la simulación de un escenario se genera un archivo .ASF (*Accident Scenario File*), el cual contiene tanto la información que el usuario ingresa, como el resultado de los cálculos. El nombre de este archivo es seleccionado por el usuario y no debe de exceder de ocho caracteres de longitud. Éste se almacena en el directorio asignado durante la instalación del programa.

Es importante mencionar que el nombre de este tipo de archivos, no debe ser modificado por ningún otro medio, ya sea un programa o el explorador de Windows, ya que de hacerlo, el archivo quedaría inservible. El trabajo con estos archivos puede realizarse de dos formas:

- Modificación del contenido de un archivo cuando un usuario no está seguro del valor de algún parámetro de entrada. Sólo se tiene que editar este valor durante la ejecución del programa, abriendo el archivo desde ARCHIE.
- Cuando el usuario desea observar los resultados para una serie de escenarios que difieren uno de otro en algún dato específico, se puede tomar el archivo original y renombrarlo. En el nuevo, se modificará el dato o datos pertinentes para luego ejecutar de nueva cuenta el programa hasta obtener los resultados de la simulación.

Exactitud y limitaciones de ARCHIE

Los procedimientos utilizados por ARCHIE son versiones simplificadas, en algunos casos, de metodologías más sofisticadas, las cuales fueron desarrolladas por profesionales en el campo. El propósito de ARCHIE es dar una aproximación general a un accidente para realizar planes de emergencia, aunque pueden sobreestimarse ciertos datos, así como subestimarse las amenazas que corre la población expuesta. Este programa omite algunos fenómenos potencialmente peligrosos, que pueden desembocar en un accidente y, que por lo tanto, pueden ser de utilidad para las personas que se dedican al desarrollo de planes de contingencia. Estas limitaciones son comunes en la mayoría de los programas de este tipo, las inhabilidades que presenta son:

- Exposición de la población a productos tóxicos de combustión generados por incendios.
- Daños a personas e inmuebles por el impacto de fragmentos son lanzados durante la explosión a gran velocidad.
- Daños y lesiones por líquidos sobrecalentados durante la explosión, ya sea que esta ocurra dentro de un edificio o dentro de alguna otra estructura.

- Daños en inmuebles a causa de la exposición a la radiación térmica y sustancias corrosivas.
- Amenazas inusuales o fenómenos asociados con las reacciones químicas de materiales peligrosos.

ARCHIE está diseñado para manejar sustancias relativamente puras. El tratamiento de sustancias compuestas depende del conocimiento que tenga el usuario sobre ellas, tanto de sus características físicas como de las químicas, ya que durante la ejecución del programa se solicitan todos estos datos.

ARCHIE no está exento de proporcionar resultados erróneos, ya que depende en gran medida de los datos que ingrese el usuario. Sin embargo, a lo largo del proceso, se llevan a cabo algunas verificaciones para tratar de que la información ingresada sea la correcta.

2.3 Procedimientos para el análisis de consecuencias por incendios y evaluación de su impacto.

Existen diversos métodos para la evaluación de riesgos ocasionados por incendios. A continuación se explican los más importantes.

2.3.1 Modelo de radiación térmica por Bolas de fuego

Una emisión de hidrocarburo licuado puede arder como una de bola de fuego. Cuando esto pasa, la bola de fuego puede crecer e incluso flotar continuamente. La radiación térmica dependerá del tamaño de la bola de fuego, la distancia del observador (cuando esta está cambiando continuamente) así como su orientación. Algunos datos experimentales y observaciones indican que la duración de este tipo

de fenómenos es de tan sólo unos segundos. Entonces, si el flujo del incidente desde la localización del observador cambia rápidamente en el tiempo, luego dependerá de la forma de la flama, el poder de emisión, la atenuación y el factor de visión.

Junto con la transición natural tanto del tamaño como de la localización de la bola de fuego, la radiación térmica en el campo puede variar también con el tiempo. Las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3, definen el diámetro máximo y la altura del fuego alcanzada en poco segundos, así como la distancia a una zona que esté a salvo de fatalidades y lesiones. En el proceso de cálculo se realizaron algunas suposiciones simples, las cuales son:

- Se toma como combustible al propano o algunos con características similares.
- Temperatura ambiente de 20 °C (68 °F).
- Se omite la absorción atmosférica de la radiación térmica por ser insignificante.
- Fracción de energía de combustión irradiada = 0.2.
- La radiación se observa al nivel de la tierra.
- Los niveles de radiación pueden ser fatales debajo de la bola de fuego. Por ello el radio mínimo de la zona de fatalidades, es igual a la mitad del diámetro máximo calculado.

De una serie de experimentos que incluyeron vapores simples puros como el metano, etano y propano, se dedujo una escala de relaciones dinámicas de la geometría de las bolas de fuego. La primera de estas relaciones incluye su diámetro máximo su altura además de su duración, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$D_{\max} = 16 W^{1/3} \quad (2.1)$$

$$Z = 26.3 W^{1/3} \quad (2.2)$$

$$T = 2.23 W^{1/6} \quad (2.3)$$

Donde:

W = Masa en el recipiente (lb)

D_{\max} = Diámetro máximo de la bola de fuego (ft)

Z = Altura máxima de la bola de fuego (ft)

T = Duración de la bola de fuego (s)

Se han establecido criterios de daños por fatalidades y lesiones basándose en datos experimentales por quemaduras en piel de cerdo. El Modelo de Energía Crítica asume que la severidad de las quemaduras depende de la cantidad de energía absorbida por la piel luego que la temperatura esta por arriba de los 55 °C. Estos criterios representan dos niveles de radiación térmica:

- Un flujo de calor que sobrepasa los 160 kJ/m² puede ser fatal en humanos, provocando daños irreversibles en el tejido de la piel.
- El nivel más bajo de este flujo de calor, correspondiente a 40 kJ/m², puede causar dolor o quemaduras leves de segundo grado.

Por ello, en el cálculo, estos dos valores son usados para separar el radio de las zonas seguras de las que están en riesgo cuando ocurre un fenómeno de este tipo. Así, se desarrollaron ecuaciones simples para obtener el resultado del análisis numérico de un modelo riguroso de bolas de fuego peligrosas.

La zona de fatalidad, XF (Distancia de separación segura para evitar fatalidades, ft), se determina con la siguiente ecuación:

$$XF = 1.48 W^{0.56} \quad W \geq 2000 \text{ lb} \quad (2.4)$$

$$XF = 8 W^{0.33} \quad W < 2000 \text{ lb} \quad (2.5)$$

La zona de fatalidad mínima corresponde al radio máximo de la bola de fuego. Esto asume que cualquier persona que se encuentre debajo de la bola de fuego puede morir.

La zona de daño por quemaduras, XI (Distancia de separación segura para evitar el daño por quemaduras, ft), se calcula de la siguiente forma:

$$XI = 4.53 W^{0.52} \quad (2.6)$$

2.3.2 Modelo de Chorros de fuego

El propósito de este modelo es determinar la longitud de la flama asociada al chorro de fuego y la zona sujeta a niveles dañinos de radiación térmica. El método supone la existencia de un orificio circular en un tanque de almacenamiento o tubería por donde escapan vapores incendiados a alta velocidad, de modo que el chorro se ve dominado por el impulso inicial de los gases de escape y no por flotación.

La longitud de la flama es proporcional a la masa molecular con relación al combustible presente en el aire y el diámetro del chorro. De acuerdo con modelos teóricos y correlaciones hechas con datos experimentales, la longitud de la flama se puede obtener con la ecuación (2.7):

$$\frac{F_l}{D_j} = \frac{1050}{C_{cl}} \sqrt{\frac{M_a}{M_f}} \quad (2.7)$$

Donde:

- F_l Longitud de flama (m);
- D_j Diámetro del chorro (m);
- C_{cl} Límite inferior de inflamabilidad del gas (% V);
- M_a Peso molecular del aire;
- M_f Peso molecular del combustible.

Algunas de las suposiciones teóricas que se hicieron en este modelo son:

- El chorro de fuego es independiente del caudal total en las turbulencias.
- Se aplica el criterio de concentración si se cuenta con porciones visibles o no de flama.
- No se incluye el efecto del viento cruzado a lo largo de la flama.

Es importante señalar que el método no distingue entre flamas horizontales, verticales o inclinadas, de modo que para reducir el riesgo de exposición a la población y la posibilidad del efecto dominó, conviene asumir una flama horizontal. De acuerdo con lo anterior y considerando modelos de flamas más elaborados, se considera que la zona de exclusión deberá ser de dos veces la longitud de la flama F_l .

2.4 Procedimientos para el análisis de consecuencias por explosiones y evaluación de su impacto.

Al igual que en los incendios, existen diversos métodos para evaluar el impacto de las explosiones. A continuación se mencionan algunos de ellos.

2.4.1 Explosión no confinada de una nube de vapor

Este tipo de explosión puede producirse por la ignición de nubes de vapor inflamables, y a pesar de que es poco frecuente, es la que causa las más severas consecuencias por derramamiento.

El método que se expone, se basa en un modelo equivalente de explosión de TNT que no considera el efecto del terreno y/o obstáculos de cualquier tipo que pudieran estar presentes.

De la energía total disponible contenida en la nube explosiva, solo una fracción, dada por un factor de rendimiento, contribuye al efecto explosivo. Este factor de rendimiento se conoce con poca precisión, pero se sabe que se encuentra entre 2% y 20%. Por ejemplo, en el caso de combustibles que contienen oxígeno, el rendimiento es muy cercano al 20%, en contraste con la mayoría de los hidrocarburos alifáticos que tienen rendimientos de apenas el 3%. La Tabla 2.1 muestra el valor del factor de rendimiento para algunos químicos.

Los valores de sobre presión calculados para las explosiones TNT, son entonces usados para relacionar la sobre presión con la distancia desde el centro la explosión. La Tabla 1.3 muestra los criterios típicos de daños como función de la sobre presión para todos los tipos de explosiones.

Debe tenerse en cuenta que el modelo de TNT posee una seria limitación, la cual consiste en la sobreestimación de sobre presiones en el campo cercano. Las explosiones de tipo TNT al detonarse producen choques de ondas por presiones extremadamente altas a distancias muy cortas provocando la destrucción casi completa de prácticamente todo lo que se encuentra cerca. Sin embargo, se ha descubierto que en las explosiones no confinadas por nubes de vapor, el nivel de sobre presión en campos cercanos está muy por debajo del nivel predicho por el

<i>Valor del factor de rendimiento</i>	<i>Nombre de la sustancia</i>	
$Y_f = 0.03$	Acetaldehído (etanal)	Metanol
	Acetona	Acetato de metilo
	Acrilonitrilo	Metilamina
	Acetato amílico	Metil butil cetona
	Alcohol amílico	Cloruro de metilo
	Benceno	Metil etil cetona
	Butadieno	Formiato de metilo
	Butano	Metil mercaptano
	Buteno	Metil propil cetona
	Monóxido de carbono	Naftalina
	Cianógeno	Isoctano
	Dimetil éter	Pentano
	Etano	Etér de petróleo
	Etanol	Anhídrido ftálico
	Amina etílica	Propano
	Cloruro de etilo	Propanol
	Formiato de etilo	Propionaldehido
	Alcohol del furfural	Metano
	Heptano	Propileno
	Héxano	Dicloruro de propileno
	Ácido cianhídrico	Estireno
	Hidrógeno	Tolueno
	Sulfuro de hidrógeno	Acetato vinílico
Alcohol isobutílico	Cloruro de vinilo	
$Y_f = 0.06$	Disulfuro de carbón	Nitrito etílico
	Ciclohexano	Éter metil vinílico
	Éter dietílico	Óxido de propileno
	Etileno	Éter divinílico
$Y_f = 0.19$	Acetileno	Acetileno metílico
	Nitrato etílico	Nitrometano
	Hidracina	Acetileno vinílico
	Nitrato isopropil	

Fuente: *Federal Emergency Management Agency*

Tabla 2.1 Factor de rendimiento para vapores explosivos y gases

modelo equivalente de TNT. Basándose en estos datos, la asociación de Salud y Seguridad (HSE) sugiere que la máxima sobre presión que resulta del modelo de explosión no confinada de una nube de vapor, sea de 1 bar (15 psi). Esta recomendación, con una excepción menor, se incorporó en ARCHIE.

El modelo da al usuario la opción de calcular distancias radiales de zonas de daños para explosiones esféricas al aire libre (elevadas) o explosiones al nivel del suelo (hemisférico). Las distancias calculadas por ARCHIE para eventos al aire libre son menores que las distancias a zonas de daños a nivel del piso, en un factor de 1.26.

Algunas suposiciones simples que se hicieron en el modelo, son:

- La temperatura ambiente es de 20 °C
- La masa explosiva se compara contra un equivalente de carga de TNT
- No se consideran los efectos causados por la forma del terreno, edificios o cualquier otro obstáculo presente.

El método permite determinar la relación entre distancias y valores pico de sobre presión mediante el cálculo de la masa explosiva equivalente de TNT (ecuación 2.8).

$$m_{TNT} = \left[\frac{m_{nube} \Delta H_c Y_f}{1155} \right] \quad (2.8)$$

Donde:

m_{TNT} = Equivalente de masa de TNT (lb)

ΔH_c = Límite inferior del calor de combustión (BTU/lb)

m_{nube} = Masa de la nube explosiva (lb)

Y_f = Factor de rendimiento

2.4.2 Explosión por sobre presión en un tanque

Como se mencionó en el Capítulo 1, las explosiones también pueden resultar de una ruptura violenta de un contenedor sobre presurizado sin que exista combustión en el lugar. La energía que produce la sobre presión, proviene del volumen y presión del gas dentro del tanque. Por lo que un contenedor con poco líquido, casi vacío, corre más riesgo de sufrir una explosión severa que un contenedor casi lleno que se rompa a la misma presión.

El modelo utilizado por ARCHIE, asume que la ruptura del tanque se produce en todas direcciones. Además, asume que la explosión ocurre a nivel del piso en un campo hemisférico. Si la ruptura del tanque ocurriera en una posición elevada, las distancias de riesgo calculadas, deben ser reducidas por un factor de 1.26. El algoritmo de cálculo es el siguiente:

1. Calcular el cociente $\frac{P_i}{P_a}$ donde P_a es la presión atmosférica absoluta y P_i es la presión interna absoluta del gas a la cual se espera que se rompa el tanque.
2. Calcular el cociente $\frac{T_i}{T_a}$ donde T_a es la temperatura ambiente absoluta y T_i es la temperatura absoluta del gas dentro del tanque.
3. Determinar el cociente de sobre presión inicial P_{so} , despejándolo, por ensayo y error, de la ecuación 2.26:

$$f = 0$$

$$= \ln\left(\frac{P_i}{P_a}\right) - \ln(1 + P_{so}) - \frac{2\gamma_i}{1 - \gamma_i} \ln\left[1 - \frac{(\gamma_i - 1)P_{so}}{2\sqrt{\frac{T_i}{T_a}} \sqrt{\gamma_a^2 + 0.5\gamma_a(\gamma_a + 1)P_{so}}}\right] \quad (2.10)$$

Donde:

y_a = Cociente del calor específico de la sustancia, a presión y volumen constantes.

y_i = Cociente del calor específico del aire, a presión y volumen constantes.

4. Calcular la distancia inicial adimensional R_o :

$$R_o = \frac{1}{\left[\frac{\frac{4\pi}{3} \left(\frac{P_i}{P_a} - 1 \right)}{\gamma_i - 1} \right]^{\frac{1}{3}}} \quad (2.11)$$

5. Calcular la distancia adimensional R :

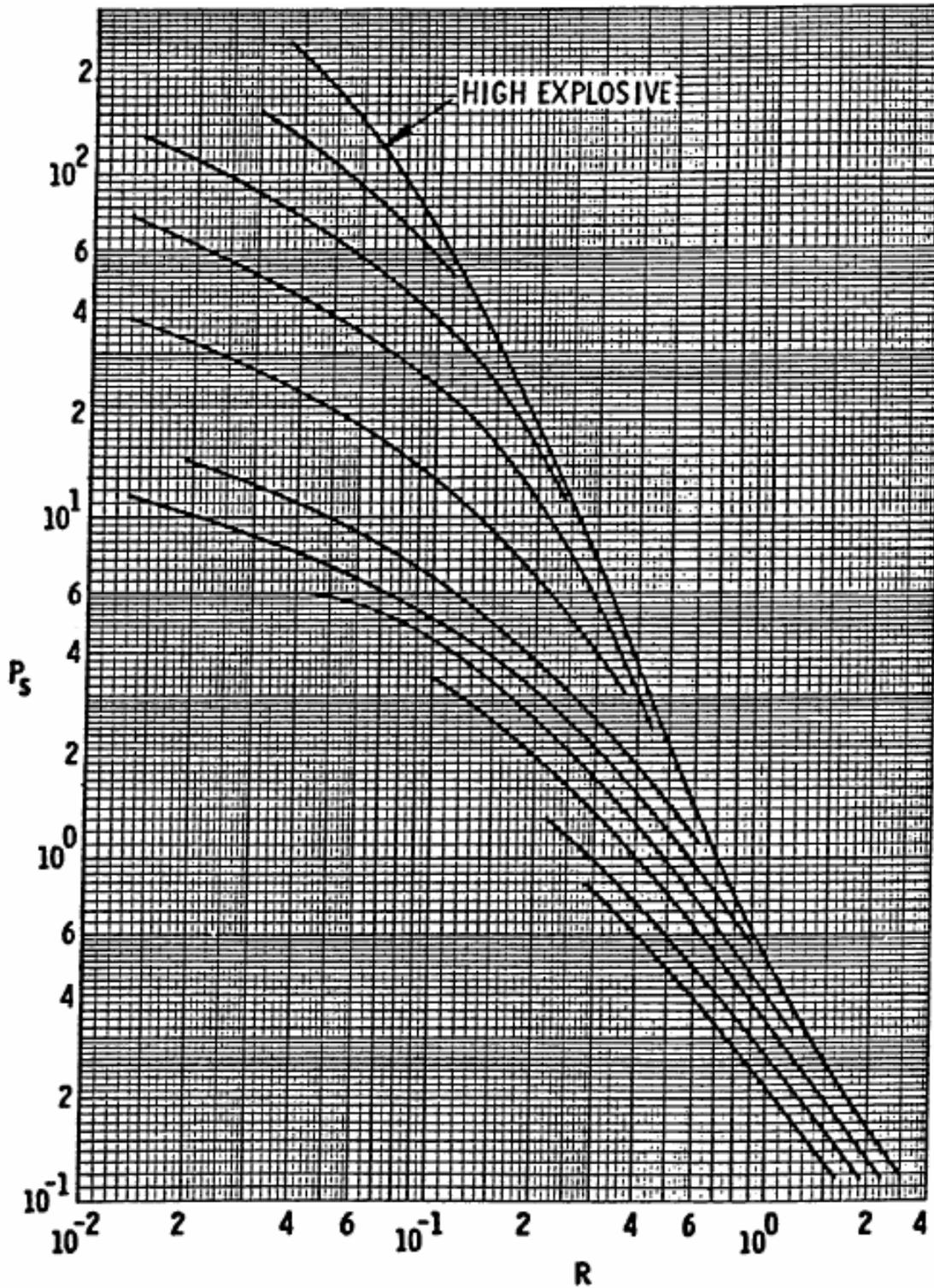
$$R = \frac{r}{\left[\frac{V \left(\frac{P_i}{P_a} - 1 \right)}{\gamma_i - 1} \right]^{\frac{1}{3}}} \quad (2.12)$$

Donde:

V = Volumen del tanque

r = Distancia deseada del tanque al valor de sobre presión dado

6. Localizar el punto inicial (R_o, P_{so}) de la Figura 2.1.



Fuente: Baker, W. E. Et al. *Explosion hazards and Evaluation*. p 106, 205-206. Elsevier Scientific Publishing Company. Estados Unidos de América. 1990.

Figura 2.1 Sobre presiones P_s versus distancias adimensionales R

7. Seguir la curva más cercana al valor de R calculado en el paso 5. Tomar el valor de P_s asociado con este valor. Si el recipiente está a nivel del piso y/o cerca de una superficie reflectora, se deberá incrementar P_s en 100% para valores de R menores a 1, y 10% para R mayor a 1.
8. Determinar el valor de sobre presión multiplicando el valor resultante anterior P_s , por el valor de la presión atmosférica P_a .

En el caso de que el volumen del recipiente se pueda representar mejor por un cilindro en lugar de una esfera, el valor calculado de sobre presión anterior debe ajustarse como sigue:

- a) Para R menor a 0.3 multiplíquese por un factor de 4 ó 5;
- b) Para R cercano a 1.0 multiplíquese por 1.6;
- c) Para valores de R arriba de aproximadamente 3.6, multiplíquese por 1.4.

Capítulo 3. Sistema de Análisis de Consecuencias generadas por Incendios y Explosiones (SACIE).

3.1 Objetivo de SACIE

La mayoría de las guías para emergencias causadas por accidentes con materiales peligrosos recomiendan realizar un análisis de consecuencias como un primer paso. Este análisis permite una mejor comprensión de la naturaleza y magnitud de las amenazas conocidas y maximizan el grado en que un plan de emergencia resuelve las necesidades reales que se presentan en un accidente.

Aunque un plan de este tipo debe proporcionar una estructura y organización suficientemente flexibles para responder a acontecimientos imprevistos, es necesario asegurarse que los que pueden ser previstos reciban la atención debida.

Hoy en día es muy importante contar con herramientas visuales que muestren un panorama general de las consecuencias que puedan originar accidentes causados por explosiones e incendios de materiales peligrosos. La importancia de estas herramientas radica en la posibilidad de simular los impactos que tienen los desastres, controlando las diferentes variables que involucran y como consecuencia, la creación de planes de contingencia. Para ello se requiere del proceso de simulación.

Los primeros programas que cumplieron con esta necesidad fueron elaborados para la plataforma MS-DOS, por lo que su uso ha quedado casi desierto. Sin embargo, buena parte del desarrollo matemático para la simulación está plasmada en este tipo de software.

Actualmente existen varios programas que realizan la simulación de consecuencias y daños ocasionados por accidentes. Éstos se dividen en dos grandes grupos: Comerciales y libres. Las versiones comerciales tienen un ambiente gráfico bastante accesible, sin embargo, éstas son muy costosas y sólo empresas con altos recursos económicos pueden acceder a ellas. Por otro lado, el software libre no cuenta con una apariencia amigable para los tomadores de decisiones, quienes necesitan escenarios gráficos fáciles de comprender.

Por ello surge la necesidad de crear un programa de tipo gráfico y de bajo costo al que pueda accederse desde cualquier punto. Que pueda ser utilizado por particulares y pequeñas empresas que realicen este tipo de estudios. Entre los beneficios que se obtendrían por utilizar esta herramienta, se encuentra la creación de planes de contingencia en base a los resultados obtenidos por la simulación de desastres, la cual se verá plasmada en un escenario totalmente amigable.

Partiendo de estas premisas, se desarrolló el **Sistema de Análisis de Consecuencias generadas por Incendios y Explosiones**, el cual permite simular los daños causados por estos dos tipos de fenómenos. Con su ayuda se puede comprender la naturaleza de estos eventos y los peligros que se les asocian, proporcionando una base para la elaboración de planes de contingencia.

Así pues, el objetivo de SACIE es proporcionar al usuario la información necesaria para prever accidentes causados por Incendios y/o Explosiones así como minimizar las consecuencias que se generen. Todo ello en un entorno gráfico fácil de usar.

Una de las metas del Sistema es ofrecer al usuario la opción de ingresar los datos en las unidades que éste los tenga y evitar pedir datos más complejos que pueden no estar disponibles.

3.2 Diseño estructural.

El Sistema de Análisis de Consecuencias generadas por Incendios y Explosiones tiene características particulares con las cuales no cuenta el programa ARCHIE, como la capacidad de proporcionar al usuario un ambiente gráfico y fácil de utilizar. Para conseguir este propósito se seleccionó un lenguaje de programación que permite manejar colores, gráficas y diseños especiales: PHP, combinado con las características del lenguaje HTML y Javascript, tanto para el diseño gráfico como para las validaciones de los formularios para cada uno de los modelos que lo conforman.

Para elaborar los escenarios gráficos del Sistema se buscaron librerías gratuitas que permiten crearlos. En primer lugar, se encontró la librería GD la cual crea gráficas muy sencillas pero no ofrece la opción de crear las tipo polar. Era de vital importancia poder crear gráficas polares, ya que los resultados de las simulaciones corresponden a distancias o radios de afectación, los cuales tienen un mayor impacto visual al ser representados en una gráfica de este tipo, ya que así el usuario tiene una idea clara de los límites de las zonas de daños cuando se presenta un accidente.

También se probó con la librería a PHP-SWF. Visualmente sus gráficas son muy atractivas porque cuenta con efectos de animación para todos los elementos que conforman una gráfica y se puede usar para crear gráficas polares. Sin embargo, PHP-SWF posee una gran desventaja en su versión libre: las gráficas que genera no se actualizan en la misma ventana Web una vez que han sido creadas. Esto representaba un problema, ya que si el usuario cambiara uno o más de los datos de entrada, los resultados obviamente debían actualizarse, y en cambio, las gráficas de PHP-SWF no lo harían. Esto se pudo determinar, ya que de primera instancia se utilizó esta librería para generar las gráficas y al realizar algunas pruebas se encontró este inconveniente, lo cual provocó que se siguieran buscando más opciones.

Finalmente se seleccionó la librería FusionCharts V3 (Librería FusionCharts), la cual genera archivos de flash que pueden ser insertados en una página Web utilizando lenguaje Javascript, PHP o HTML entre otros. Esta librería permite crear gráficas polares y actualizarlas cada vez que los datos se modifiquen, por ello es la base que utiliza SACIE para generar los escenarios gráficos.

También se utilizó una librería para generar documentos PDF a partir de código PHP, esta librería se llama FPDF (Librería FPDF). Sólo fue necesario incluirla entre los archivos que conforman al Sistema.

El modelado de la Base de Datos es tipo Entidad-Relación. Se utilizó la plataforma MySQL ya que es gratuita, posee buena seguridad y estabilidad. El Diagrama 3.1 muestra el diseño estructural de *atom*, la Base que contiene toda la información necesaria para el buen funcionamiento del Sistema. El diseño se realizó en base a las necesidades propias de cada uno de los modelos de evaluación de daños y consecuencias, partiendo de sus procesos matemáticos y los resultados que generan.

Para poder seguir un desarrollo estructurado en la programación se crearon diagramas de flujo para plasmar el funcionamiento de SACIE. El Diagrama 3.2 representa el funcionamiento del Sistema en general, el Diagrama 3.3 representa a la página que envuelve la presentación de resultados para todos los modelos, el Diagrama 3.4 el del modelo para una Explosión no confinada de vapor, y así sucesivamente.

Es importante mencionar que la programación del Diagrama 3.3 se encuentra en un solo archivo, el cual realiza la función de la simulación de daños según el modelo que haya sido seleccionado por el usuario. Este programa muestra los resultados de acuerdo a los datos de entrada.

Modelo Entidad Relación de la Base de datos

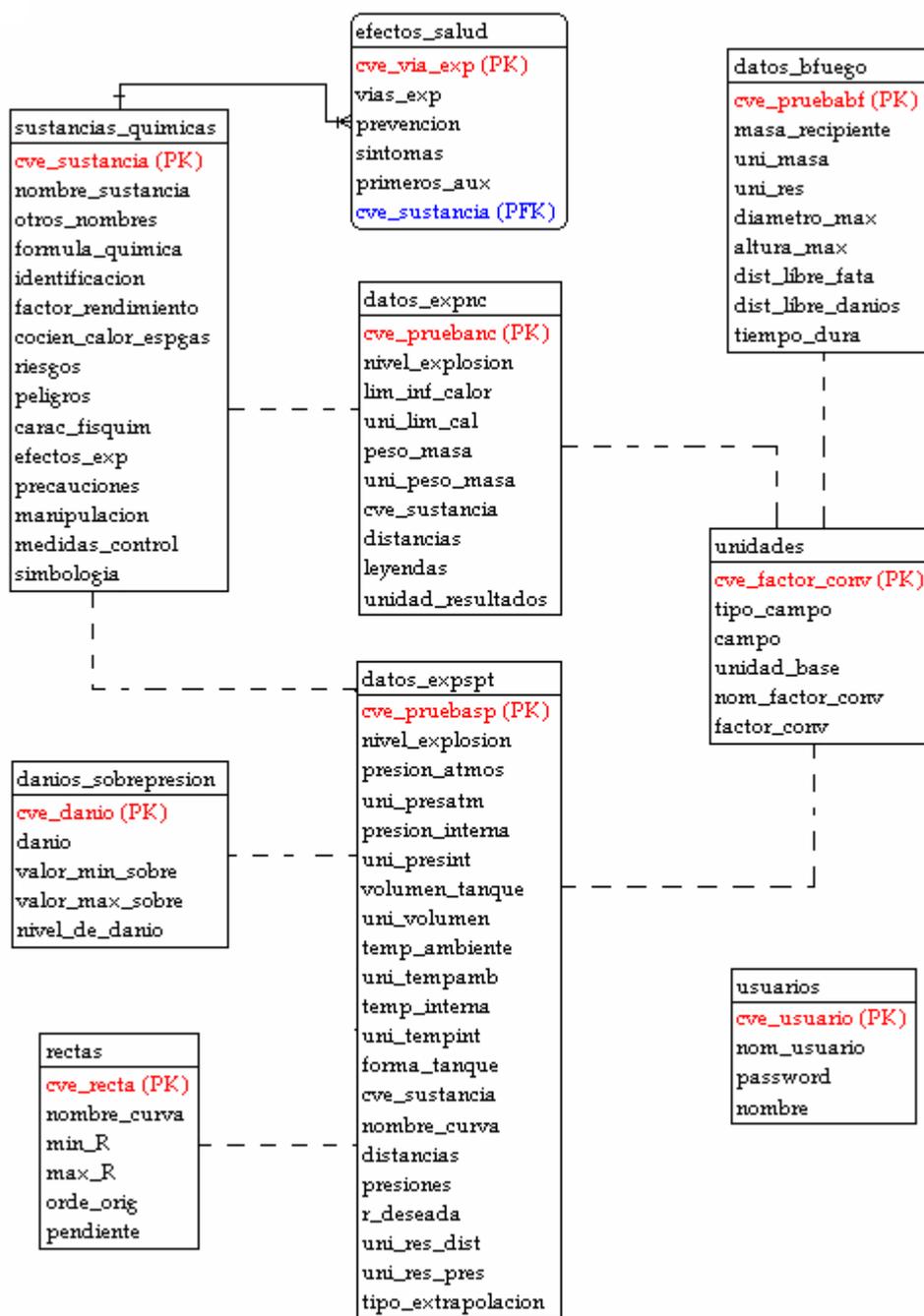


Diagrama 3.1 Modelo entidad-relación de *atom*

Funcionamiento General de SACIE

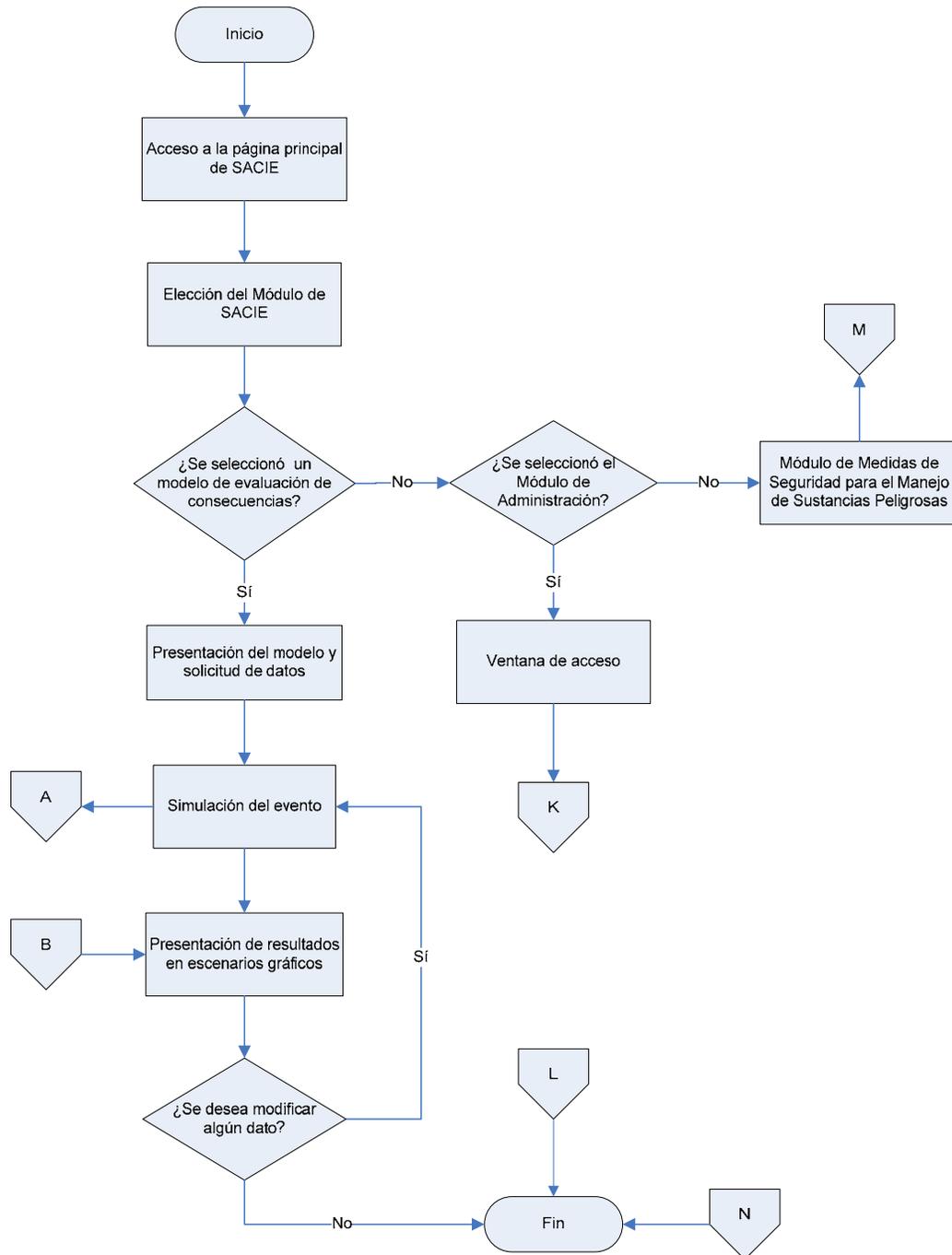


Diagrama 3.2 Funcionamiento general de SACIE

Proceso de cálculo y Resultados

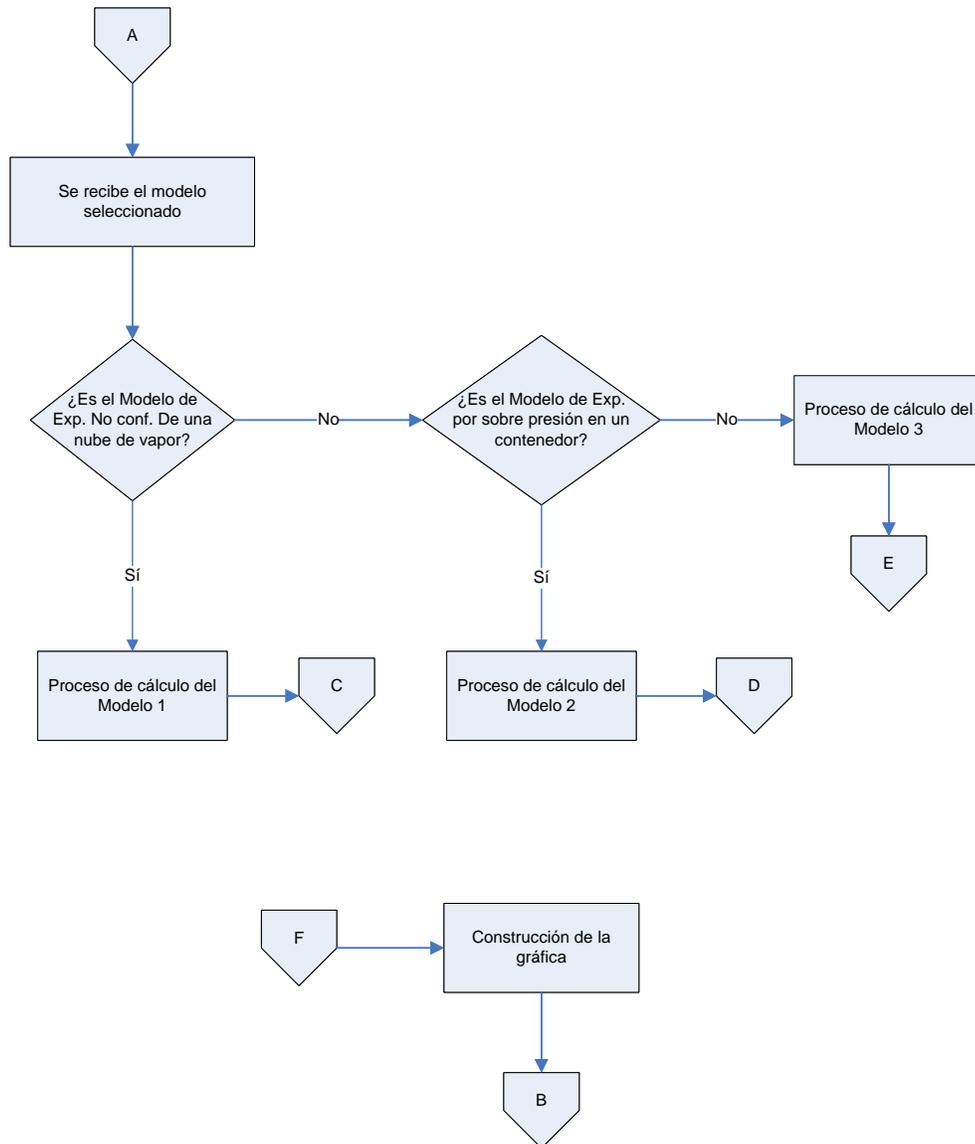


Diagrama 3.3 Proceso de cálculo y resultados

Explosión no confinada de una nube de vapor

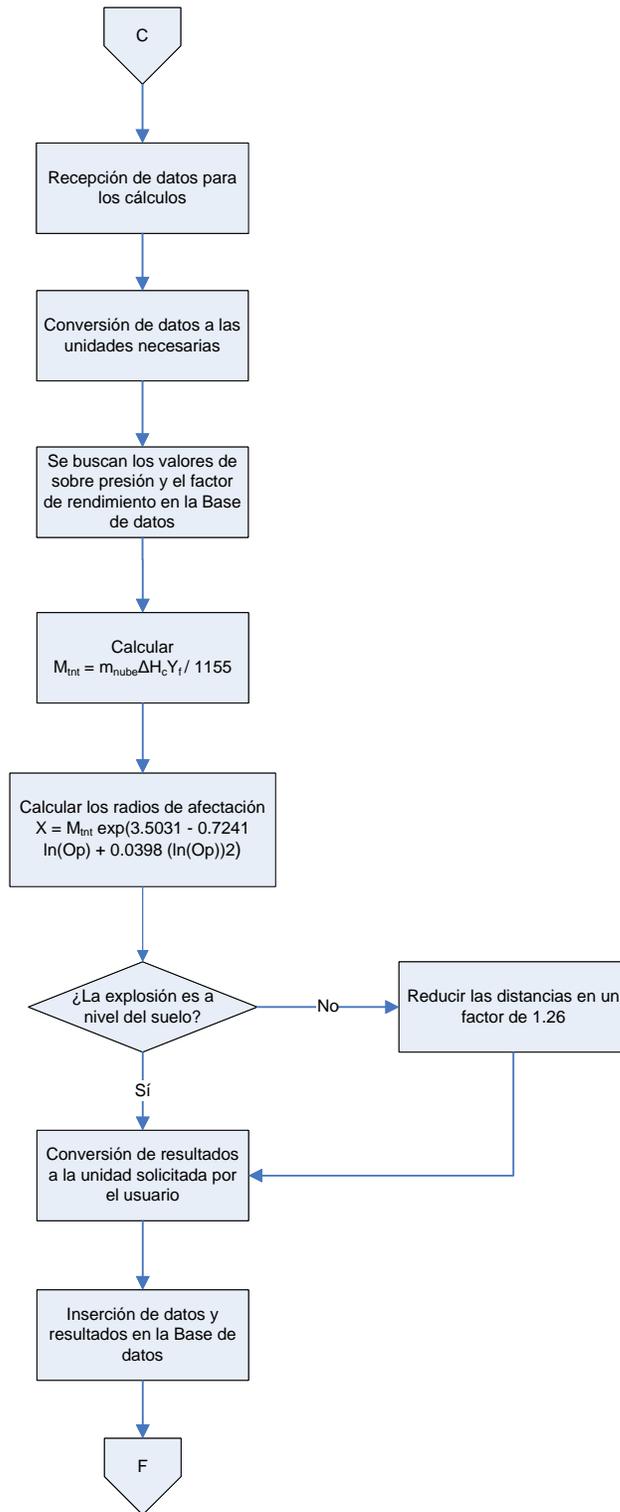


Diagrama 3.4 Modelo de explosión no confinada de una nube de vapor

Modelo de Explosión por sobre presión en un contenedor

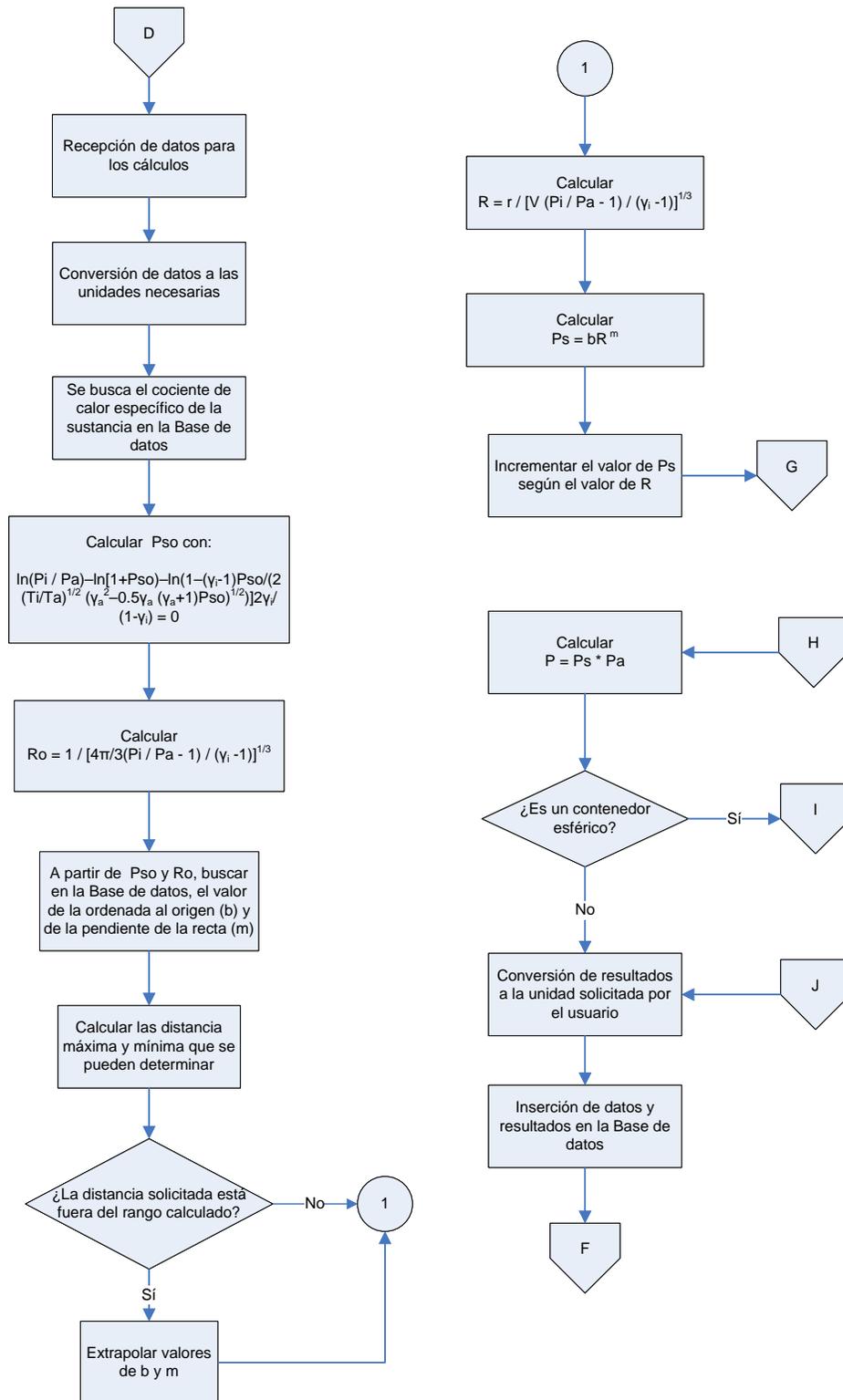


Diagrama 3.5.1 Modelo de explosión por sobre presión en un contenedor

Modelo de Explosión por sobre presión en un contenedor

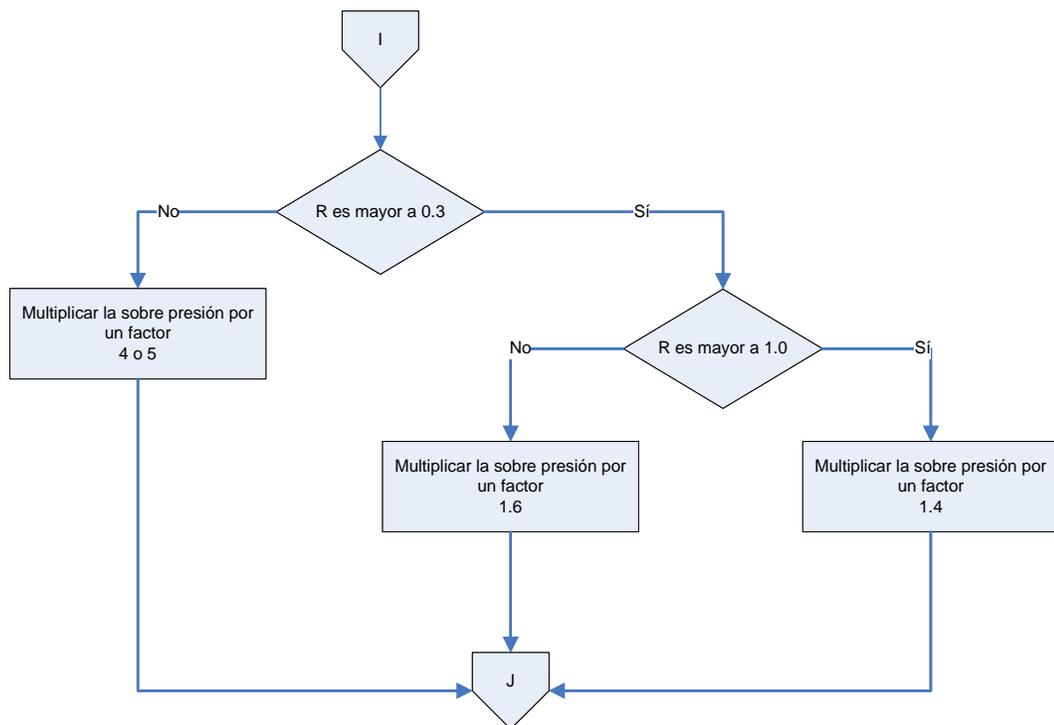
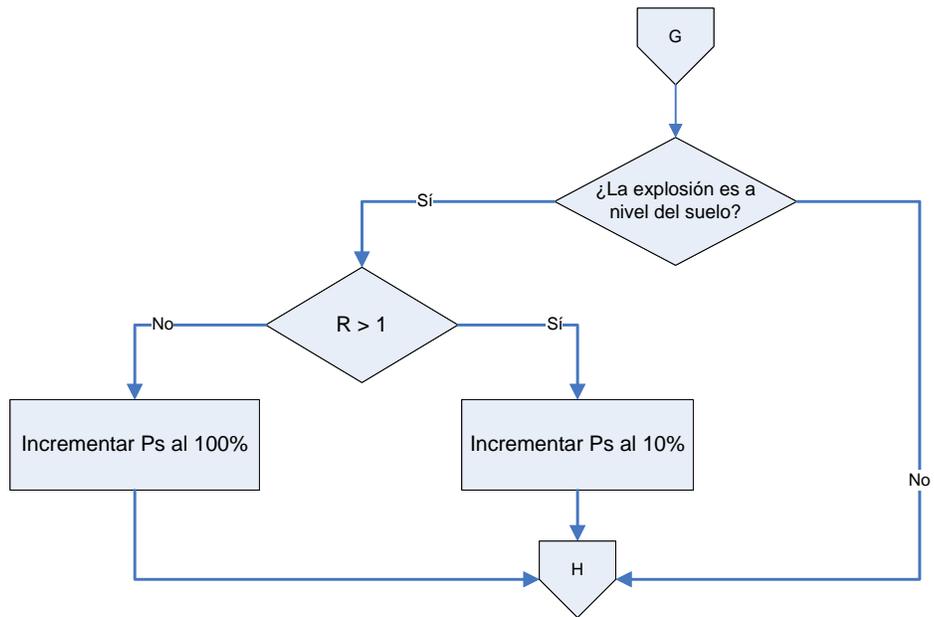


Diagrama 3.5.2 Modelo de explosión por sobre presión en un contenedor

Modelo de Radiación térmica por bolas de fuego

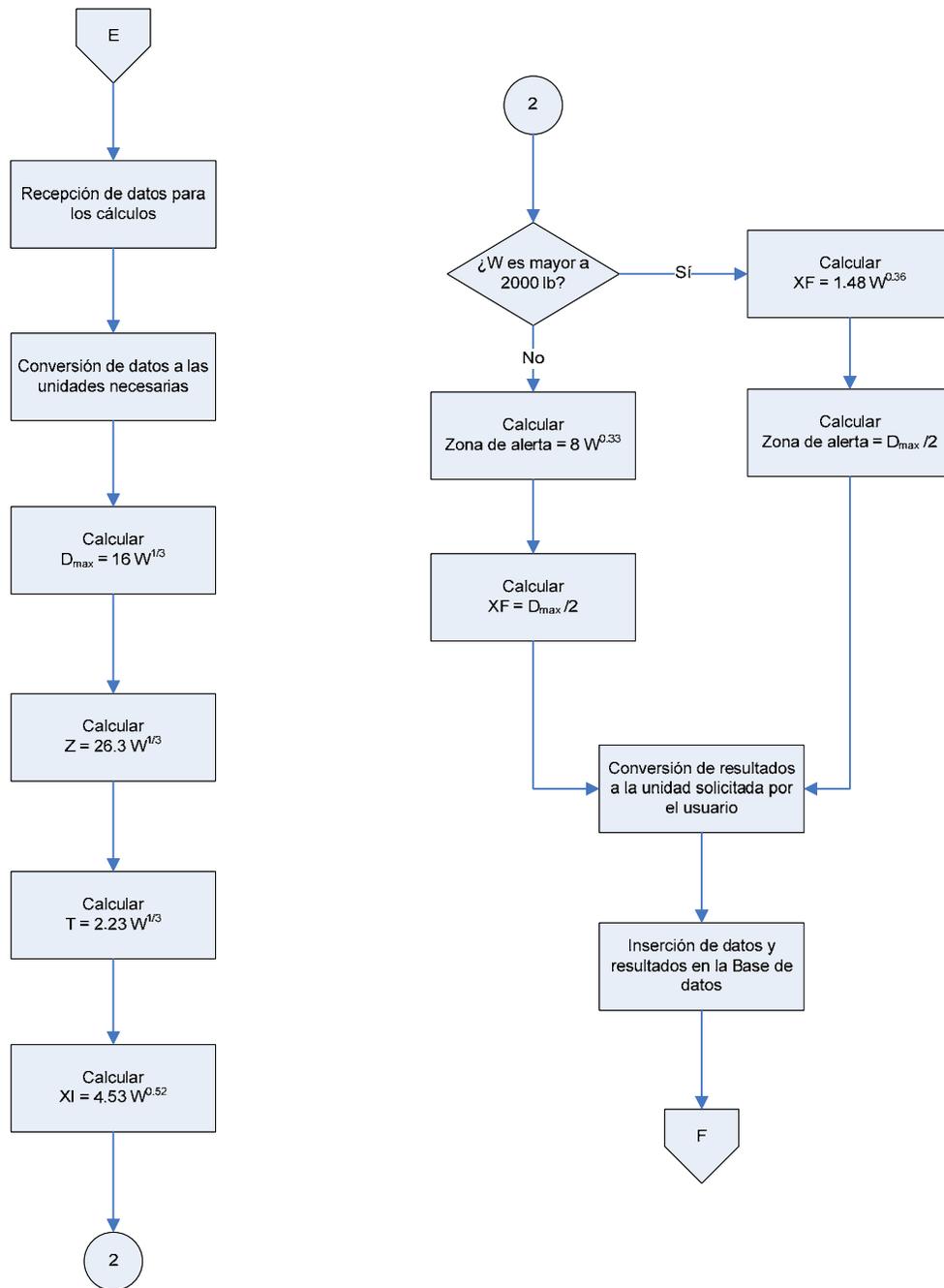


Diagrama 3.6 Modelo de radiación térmica por bolas de fuego

Módulo de Administración

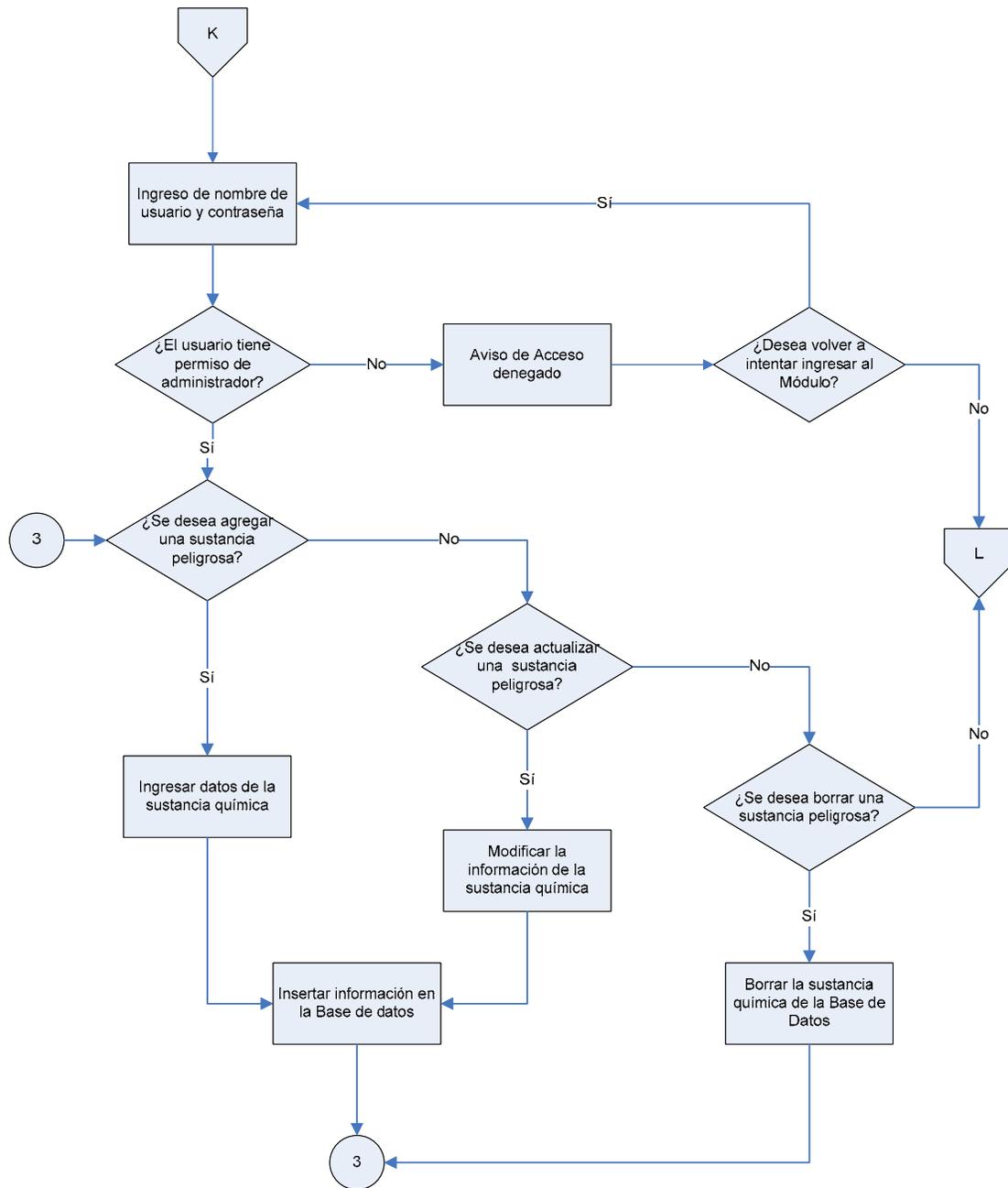


Diagrama 3.7 Módulo de administración

Módulo de Medidas de seguridad para el manejo de Sustancias Peligrosas

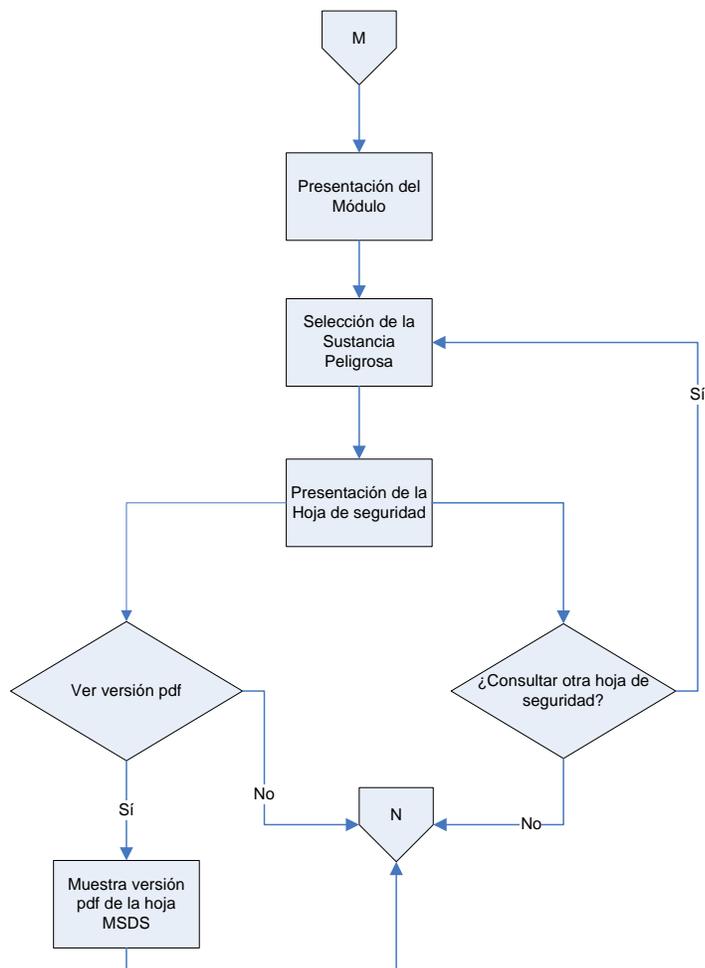


Diagrama 3.8. Módulo de medidas de seguridad para el manejo de sustancias peligrosas

De estos diagramas se obtuvo la estructura del Sistema. Éste se compone de 13 archivos (páginas en el Sistema) que contienen toda la programación. La Tabla 3.1 detalla la función de cada una de estos archivos:

Nombre de la página	Descripción
ventana_principal.htm	Presentación del Sistema.
explo_no_confinada.php	Presentación del modelo de Explosión no confinada de una nube de vapor. Recaba los datos necesarios para la simulación.
explo_sobrepres.php	Presentación del modelo de Explosión por sobre presión en un contenedor. Recaba los datos necesarios para la simulación.
bolas_fuego.php	Presentación del modelo de Radiación térmica por bolas de fuego. Recaba los datos necesarios para la simulación.
result.php	<p>Contiene la programación para realizar la simulación de los tres modelos de consecuencias y daños. Recibe el tipo de modelo, los datos de entrada y la acción que se llevará a cabo.</p> <p>Finalmente, presenta un escenario gráfico para representar los resultados.</p>
extrapola.php	Realiza la extrapolación de los valores de la gráfica de Distancia vs Presión adimensionales. Presenta el resultado de la extrapolación.
lib_funciones.php	Contiene la librería de funciones de todo el Sistema, para realizar cálculos, consultas a la Base de datos y construcción de las gráficas.

Tabla 3.1 Descripción de las páginas de SACIE

Nombre de la página	Descripción
funciones_javascript.js	Contiene las funciones que realizan las validaciones de los datos de entrada para las simulaciones, así como funciones para el diseño gráfico del Sistema.
acceso_admin.html	Es la página de acceso a la sección de administración del Sistema. Recaba el nombre del usuario y su contraseña.
mod_admin.php	Define si el usuario tiene permiso de alterar la Base de datos y de ser así, presenta las diferentes opciones que el Administrador puede ejecutar.
actualizar.php	Muestra la información de una sustancia existente para que sea editada o bien, realiza el borrado de la sustancia de la Base de datos, según sea el caso.
agregar_sust.php	Recaba los datos de la nueva sustancia química.
almacena.php	Permite la inserción a la Base de datos de la nueva sustancia química.
medidas_seguridad.php	Muestra al usuario la descripción del módulo de Medidas de seguridad para el manejo de sustancias peligrosas.
consulta_MSDS.php	Muestra la Hoja de Información de Seguridad para la sustancia peligrosa elegida en el Módulo de Medidas de seguridad.
msds_pdf	Contiene la programación para generar las hojas MSDS en formato PDF.
emx_nav_left.css	Contiene la información de las hojas de estilo que conforman el diseño gráfico del Sistema.

Tabla 3.1 (Continuación) Descripción de las páginas de SACIE

3.3 Desarrollo de SACIE.

SACIE es capaz de realizar la evaluación de daños y consecuencias para los siguientes fenómenos:

- Explosión no confinada de una nube de vapor,
- Explosión por sobre presión en un contenedor, y
- Radiación térmica por bolas de fuego.

Además posee dos módulos más: el Módulo de Administración y el de Medidas de Seguridad para el manejo de Sustancias Peligrosas.

Con la finalidad de que el Sistema respondiera a cada uno de estos módulos, se realizaron varias etapas:

1. Estudio de la metodología que sigue ARCHIE para los modelos seleccionados.
2. Creación de diagramas de flujo del funcionamiento general del Sistema y de cada uno de los modelos que conforman a SACIE.
3. Investigación de la información necesaria para completar la Base de Datos como las características químicas de las sustancias peligrosas que se involucran en accidentes, entre otros datos.
4. Configuración del software necesario para que funcionara el Sistema.
5. Diseño de la Base de Datos y su construcción.
6. Desarrollo de la programación de cada modelo.
7. Pruebas al Sistema.

A continuación se detalla cada una de estas etapas, y en su caso, las consideraciones que se tomaron en cuenta para la programación.

3.3.1 Estudio de la metodología de ARCHIE y Creación de los diagramas de flujo para SACIE

Como punto inicial de esta tesis, se estudio la metodología que sigue ARCHIE, tanto en su documentación como en su ejecución. Al realizar la comparación entre éstas, se observo que existen ciertas diferencias entre los datos involucrados en los procedimientos matemáticos y los datos que ARCHIE solicita para realizar los cálculos. En algunos casos los resultados arrojados por el programa no coincidieron con los obtenidos al aplicar la metodología manualmente. Debido a que no hay información disponible sobre la programación de ARCHIE, se tomó como base para el desarrollo de SACIE la metodología descrita en la documentación. De ésta, se identificaron los datos que son propiedades químicas de las sustancias peligrosas y se incluyeron en el diseño de la Base de Datos, con el objeto de evitar solicitar al usuario datos que no tenga a la mano.

Además, al estudiar todos los modelos que incluye ARCHIE, se identificaron aquellos que tienen una buena documentación de sus procesos y cuáles no. Por ello, se seleccionaron exclusivamente tres de estos modelos: Explosión no confinada de una nube de vapor, Explosión por sobre presión en un contenedor y Radiación térmica por bolas de fuego. Ya que los procesos matemáticos de estos modelos se pueden programar correctamente y con la certeza de que los resultados que se obtengan al utilizarlos serán los correctos. Lo cual es fundamental para que esta tesis cumpla cabalmente con su objetivo.

Luego de identificar claramente los procesos de cálculo para estos tres modelos, se elaboraron los diagramas de flujo que se mencionaron anteriormente, los cuáles sirvieron para estructurar adecuadamente la programación del Sistema. Estos diagramas corresponden a los Diagramas 3.2 al 3.8.

3.3.2 Diseño de la Base de Datos

Como se mencionó anteriormente, para el diseño de la Base de Datos se tomaron en cuenta los datos que se necesitan para realizar la simulación de consecuencias para cada uno de los modelos de accidentes.

Básicamente *atom* está compuesta por tablas que almacenan los datos de entrada para cada modelo, además de los datos que resultan de la simulación. La Tabla 3.2 contiene la información de las tablas básicas de la Base de Datos.

Tabla	Descripción
datos_expnc	Almacena los datos de entrada y los resultados del modelo de Explosión no confinada de una nube de vapor.
datos_expspt	Almacena los datos de entrada y los resultados del modelo de Explosión por sobre presión en un contenedor.
datos_bfuego	Almacena los datos de entrada y los resultados del modelo de Radiación térmica por bolas de fuego.

Tabla 3.2 Descripción de las tablas principales de *atom*

Para el diseño del SACIE, se consideró la importancia de contar con las características químicas de las sustancias peligrosas almacenadas en la Base de datos, con el fin de facilitar a los usuarios el manejo del Sistema y así cumplir con una de sus metas. De esta forma, simplemente se debe seleccionar el nombre del material y SACIE obtendrá de la Tabla de sustancias químicas los datos pertinentes para las simulaciones.

Además, se le dio un valor agregado al Sistema: la posibilidad de que el usuario ingrese los datos en las unidades en que éste los tenga, sin tener que realizar ninguna conversión extra. Para este fin, se diseñó una tabla que contiene las unidades de medida para los diferentes datos y sus factores de conversión. Con lo que se satisfacen todas las metas de SACIE.

También existen otras tablas muy importantes, ya que permiten obtener la información necesaria para los cálculos matemáticos y la presentación de resultados, como se aprecia en la Tabla 3.3.

Tabla	Descripción
danios_sobrepresion	Contiene los Daños esperados por la sobre presión en una explosión. Estos daños son los que se muestran en la Tabla 1.3.
efectos_salud	Almacena la información detallada de los efectos negativos en personas causados por la exposición a sustancias peligrosas.
rectas	Contiene los datos de las curvas que conforman a la gráfica de Presión vs Distancia adimensional R, Figura 2.1. Tales datos corresponden a la pendiente y ordenada al origen de rectas pequeñas que, en conjunto, forman a cada una de las curvas de esta gráfica.
sustancias_quimicas	Almacena la información química y de utilidad en caso de accidentes, de las sustancias químicas.
unidades	Contiene los factores de conversión para las diferentes unidades de medida.
usuarios	Almacena la información de los usuarios que pueden alterar la tabla de las sustancias químicas, en este caso, corresponde a los usuarios con perfil de administrador del Sistema.

Tabla 3.3 Descripción de las Tablas restantes de *atom*

3.3.3 Configuración del software para el desarrollo de SACIE

Como se ha mencionado, SACIE está programado en el lenguaje PHP. Por ello se utilizó el servidor local **Apache**, el cual es gratuito y permite que los programas generados en PHP se ejecuten adecuadamente.

La versión de Apache que se instaló es la 2.2.2 para Windows, además de PHP 4.4.2, MySQL 5.0.21 y PHPMyAdmin 2.8.2.4. Posteriormente, se adecuaron los archivos de configuración **httpd.conf**, **php.ini** **my.ini** y **config.inc.php**, para que poder llevar a cabo la programación del Sistema y la creación y uso de la Base de Datos.

3.3.4 Investigación de información para la Base de Datos y su construcción

Para poder completar la información necesaria para la Base de Datos, se investigaron las características químicas de algunas sustancias peligrosas, así como la forma de evitar accidentes por su uso y los primeros auxilios que se deben aplicar a la población expuesta. Esto último para el Módulo de **Medidas de Seguridad para el manejo de Sustancias Peligrosas**, en cual el usuario puede consultar las hojas de seguridad sobre las diferentes Sustancias Peligrosas que contiene SACIE (Fichas Internacionales de Seguridad Química , FISQ).

Por otra parte, en el proceso matemático de ARCHIE para las simulaciones, se señala claramente las unidades en que deben estar expresados los datos involucrados para que los resultados obtenidos sean correctos. Tomando en cuenta que una de las metas de SACIE es darle al usuario la opción de ingresar los datos en cualquier unidad, se realizó la recopilación de los factores de conversión para las unidades de

peso, energía, volumen, longitud, temperatura y presión, con los que el Sistema realiza las conversiones pertinentes.

También, en el procedimiento matemático del modelo de Explosión por sobre presión en un contenedor, la presión adimensional P_s se determina por la lectura del dato en la gráfica de la Figura 2.1, proceso que no puede llevarse a cabo en el Sistema. Por ello, se consideró necesario almacenar en una tabla los datos de esta gráfica: el valor de la ordenada al origen y de la pendiente para cada una de las curvas que la conforman.

Para este fin, se investigó la forma de calcular el valor de un punto y la ecuación de una recta en la escala logarítmica (Masters, 1998). De este modo, se segmentó a cada una de las curvas de la gráfica de Distancia vs Presión adimensional en pequeñas rectas y para cada una de ellas se obtuvieron dos puntos, a partir de los cuales se obtuvo el valor de la ordenada al origen y de la pendiente correspondientes.

Por ejemplo: a la curva que aparece en la parte inferior de la gráfica, se le asignó el nombre “Uno”. Se segmentó ésta en dos rectas y se obtuvieron los dos puntos de cada una

Recta	x_1	y_1	x_2	y_2
1	0.32	0.75	0.5	0.5
2	1.5	0.13	0.6	0.4

Tabla 3.4 Puntos para las rectas que conforma a la curva “Uno”

De estos puntos, se obtienen los valores para la pendiente (m) y la ordenada al origen (A) de cada recta, como se observa a continuación:

$$m_1 = \frac{(\log_{10} 0.5) - (\log_{10} 0.75)}{(\log_{10} 0.32) - (\log_{10} 0.5)} = -0.90852975$$

$$A_1 = \frac{0.75}{0.32^{-0.90852975}} = 0.266364$$

$$m_2 = \frac{(\log_{10} 0.4) - (\log_{10} 0.13)}{(\log_{10} 1.5) - (\log_{10} 0.6)} = -0.22660861$$

$$A_2 = \frac{0.13}{1.5^{-1.22660861}} = 0.213766$$

Este procedimiento se llevó a cabo para las 11 curvas obteniéndose los datos que conforman la tabla *rectas* de la Base de datos.

Nombre de la curva	Número de recta	Límite inferior	Límite superior	Pendiente (m)	Ordenada al origen (A)
Uno	1	0.28	0.649	-0.908529746	0.266363859
Uno	2	0.65	1.6	-1.226608605	0.213765889
Dos	3	0.22	0.36	-1	0.286
Dos	4	0.361	0.75	-1	0.3
Dos	5	0.751	1.9	-1.449660287	0.27
Tres	6	0.1	0.14	-0.704501525	0.675786736
Tres	7	0.141	0.27	-0.859087483	0.497142258
Tres	8	0.271	0.59	-1	0.4
Tres	9	0.6	2.4	-1.218702656	0.34877528
Cuatro	10	0.044	0.059	-0.265201107	2.620555718
Cuatro	11	0.06	0.0949	-0.48519921	1.468081386
Cuatro	12	0.095	0.149	-0.675479664	0.907380108
Cuatro	13	0.15	0.229	-1.207046642	0.353376129
Cuatro	14	0.23	0.49	-1.06490981	0.47166127
Cuatro	15	0.5	1.2	-1.449660287	0.390757356
Cinco	16	0.013	0.029	-0.331303856	2.736054141
Cinco	17	0.03	0.0649	-0.425723496	1.988247725
Cinco	18	0.065	0.129	-0.50787345	1.552732181
Cinco	19	0.13	0.229	-0.610052026	1.194418166
Cinco	20	0.23	0.459	-0.863433305	0.742588761
Cinco	21	0.46	0.9	-1.303503533	0.488138403
Seis	22	0.019	0.029	-0.361865205	3.518102423

Tabla 3.5 Datos tabulares de la gráfica de Distancia vs Presión adimensional

Nombre de la curva	Número de recta	Límite inferior	Límite superior	Pendiente (m)	Ordenada al origen (A)
Seis	23	0.03	0.049	-0.389934535	3.135361329
Seis	24	0.05	0.0849	-0.527835266	2.038485611
Seis	25	0.085	0.149	-0.438407456	2.289465938
Seis	26	0.15	0.29	-1.059357426	0.690755787
Seis	27	0.3	0.6	-1.296548703	0.579168587
Siete	28	0.013	0.0269	-0.517995359	4.217852622
Siete	29	0.027	0.049	-0.557360592	3.824469184
Siete	30	0.05	0.089	-0.588253444	3.486349291
Siete	31	0.09	0.149	-0.916260741	1.576458751
Siete	32	0.15	0.049	-1.277631876	0.831547378
Siete	33	0.25	0.36	-1.632521381	0.560336948
Ocho	34	0.013	0.039	-0.436829205	11.17793125
Ocho	35	0.04	0.0749	-0.782921215	3.640655719
Ocho	36	0.075	0.129	-0.759703074	4.173574471
Ocho	37	0.13	0.179	-1.066858737	2.114101059
Ocho	38	0.18	0.279	-2.105448714	0.371319014
Ocho	39	0.28	0.44	-2.126822181	0.432631277
Nueve	40	0.014	0.0319	-0.389934535	23.92795625
Nueve	41	0.032	0.0649	-0.641295	9.518517795
Nueve	42	0.065	0.089	-0.624434504	9.501876286
Nueve	43	0.09	0.139	-0.942566858	4.3372728
Nueve	44	0.14	0.179	-1.456671289	1.513725175
Nueve	45	0.18	0.24	-1.939941098	0.67806822
Diez	46	0.03	0.0409	-0.666284999	14.71209321
Diez	47	0.041	0.0649	-0.809201251	9.424350827
Diez	48	0.065	0.11	-1.015483587	5.403864369
Once	49	0.036	0.049	-0.908560945	11.70911515
Once	50	0.05	0.0649	-1.146190059	5.737790901
Once	51	0.065	0.0949	-1.481705696	2.333223994
Once	52	0.095	0.149	-1.753413685	1.209463618
Once	53	0.15	0.259	-1.670107186	1.312058186
Once	54	0.26	0.649	-2.363379643	0.4358131
Once	55	0.65	1.49	-1.754353242	0.507045424
Once	56	1.5	3	-1.175150718	0.39957617

Tabla 3.5 (Continuación) Datos tabulares de la gráfica de Distancia vs Presión
adimensional

Una vez que se tuvo toda la información, se prosiguió a la construcción de *atom* con la ayuda de PHPMyAdmin. Posteriormente se incorporó la información en las tablas correspondientes.

3.3.4 Desarrollo de la programación.

Antes de desarrollar la programación del Sistema, se definió el diseño gráfico de éste. El propósito fue contar con un menú permanente para acceder a cualquiera de los modelos y módulos de los que se compone SACIE, así como presentar los datos de entrada en los escenarios de resultados para que el usuario pudiese modificarlos a su conveniencia. De esta forma, el diseño gráfico de SACIE se presenta en la Figura 3.1:



Figura 3.1 Diseño gráfico de SACIE

Como se dijo anteriormente, SACIE se compone de tres modelos de simulación de daños y consecuencias: dos para explosiones y uno más para incendios. Todos ellos requieren de datos de entrada que deben cumplir con ciertas expectativas para simularse adecuadamente, como lo son: las unidades de medida correctas, valores dentro de los rangos permitidos, etc.

Para cumplir con este fin, el Sistema incluye la validación de los datos de entrada para todos los modelos. Estas validaciones se realizaron en el lenguaje Javascript y están almacenadas en el archivo **funciones_javascript.js**. Ésta librería contiene las funciones que validan los datos de los formularios de los modelos, que estos estén dentro del rango permitido y que efectivamente se trate de un número y no cualquier dato.

Además, cada uno de los modelos que conforman al Sistema, posee características particulares muy importantes, las cuales se tomaron en cuenta para poder llevar a cabo la adecuada programación.

A continuación, se detallan las particularidades de cada modelo.

Modelo de Explosión no confinada de una nube de vapor

Este modelo necesita los siguientes datos para realizar los cálculos:

- Límite inferior del calor de combustión.
- Nivel de la explosión.
- Factor de rendimiento.
- Peso de la masa explosiva

Sin embargo, SACIE omite solicitar el valor del factor de rendimiento de la sustancia química, sólo necesita saber el nombre de ésta y posteriormente realizará la búsqueda del dato en *atom*.

También, al estudiar este modelo, surgió la pregunta de dónde se obtendrían los valores pico de sobre presión para aplicarlos en la ecuación 2.9 para determinar las distancias a las cuáles estos ocurren. Pero al leer toda la información sobre las

explosiones, se descubrió que estos valores se pueden tomar de la Tabla 1.3, por ello se incluyó esta información en la Base de datos. Así pues, SACIE obtiene los radios de afectación a partir de valores predeterminados de sobre presión.

La Figura 3.2 muestra la presentación del modelo y los datos requeridos para llevar a cabo la simulación.



Figura 3.2 Modelo de Explosión no confinada de una nube de vapor

Por otro lado, para la construcción del escenario gráfico que representa las distancias obtenidas, se consideró pertinente sólo graficar algunas de ellas para apreciar claramente el efecto de la explosión no confinada, por lo que se definieron 5 niveles de daños en los que se agrupan todos los radios que resultan de la simulación, como se muestra en la Tabla 3.6:

Zonas por nivel de daño	Rango de valores de sobre presión (psia)	Color
Muy bajo	0.03 - 0.04	Azul
Bajo	0.1 - 0.7	Verde
Medio	1 - 3	Morado
Alto	3 - 9	Naranja
Muy alto	10 - 29	Rojo

Tabla 3.6 Clasificación de Zonas de riesgo por nivel de daño

También, debido a que la Zona de daños de nivel Muy bajo se encuentra a una distancia mayor del centro de la explosión que las demás, se decidió no graficarla ya que los resultados no se aprecian adecuadamente, tal como puede observarse en la siguiente Figura:

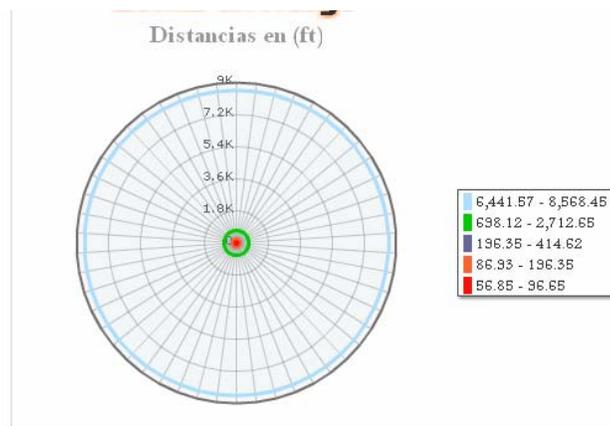


Figura 3.3 Gráfica con las 5 zonas de daños

Finalmente el Sistema muestra los resultados con las 4 zonas más representativas, como se aprecia en la Figura 3.4:

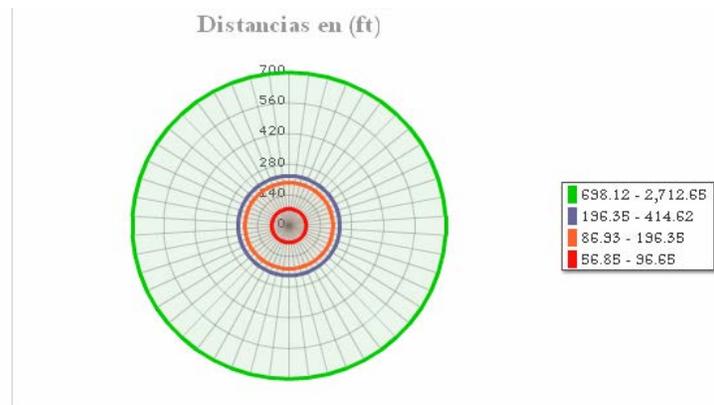


Figura 3.4 Gráfica con 4 zonas de daños

El Sistema ofrece la posibilidad de presentar estos radios de afectación en metros, pulgadas, yardas y pies. Para complementar los resultados, se anexa una Tabla de daños detallados.

Es importante señalar que las zonas de afectación ayudarán al usuario a planear las acciones que debe llevar a cabo frente a este fenómeno, como es la protección de personas. Además, permite conocer los daños en inmuebles.

Modelo de Explosión por sobre presión en un contenedor

Para desarrollar la simulación de riesgos, este modelo necesita los siguientes datos:

- Presión atmosférica absoluta.
- Presión absoluta interna del gas a la que se espera que éste explote.
- Temperatura absoluta ambiental.
- Temperatura absoluta del gas en el interior del tanque.

- Cociente de los calores específicos a presión y volumen constante (c_p/c_v) de la sustancia química.
- Cociente de los calores específicos a presión y volumen constante del aire.
- Volumen del gas en el tanque.
- Distancia desde el centro del tanque hasta el valor deseado de sobre presión.
- Forma del tanque.
- Nivel de la explosión.

SACIE le solicita al usuario la mayoría de estos datos, sin embargo, al igual que en el modelo de Explosión no confinada de una nube de vapor, el Sistema pregunta el nombre de la sustancia química involucrada para realizar la búsqueda en *atom* del valor para el cociente del calor específico γ_i . Para γ_a el Sistema toma el valor de 1.4.

Luego entonces, en el caso de este modelo, a pesar de que su metodología detalla extensamente sus expresiones matemáticas y cuáles son los resultados que se obtienen, éstos no coinciden con los arrojados por ARCHIE. En la documentación se indica que a una distancia determinada desde el centro de la explosión, se obtendrá un valor de presión (o sobre presión) mientras que ARCHIE da como resultado una serie de distancias con los daños posibles, de forma similar a la tabla de daños complementaria del modelo de Explosión no confinada de una nube de vapor. Por tal motivo, se deduce que ARCHIE lleva un proceso a la inversa del que se presenta en la documentación.

A pesar de este inconveniente, se tuvo cuidado de programar correctamente el modelo representado en la documentación por lo que los escenarios muestran el valor de sobre presión para la distancia que desee el usuario.

Como primer paso de la programación de la Explosión por sobre presión en un contenedor, se generaron los datos tabulares de la gráfica de Distancia vs Presión

adimensional, como se explicó anteriormente. A partir de estos valores, se observa que dependiendo de los datos de entrada puede o no existir un valor de sobre presión para la distancia pedida por el usuario. Por lo que, posteriormente, se agregó una sección de extrapolación de los datos tabulares para dar resultado a la distancia deseada por el usuario. Este procedimiento se encuentra en el archivo **extrapola.php**, el cual será descrito más adelante.

Por otra parte, ARCHIE indica que el valor de P_{so} se obtiene mediante la ecuación 2.10 por ensayo y error:

$$f = 0$$

$$= \ln\left(\frac{P_i}{P_a}\right) - \ln(1 + P_{so}) - \frac{2\gamma_i}{1 - \gamma_i} \ln\left[1 - \frac{(\gamma_i - 1)P_{so}}{2\sqrt{\frac{T_i}{T_a}}\sqrt{\gamma_a^2 + 0.5\gamma_a(\gamma_a + 1)P_{so}}}\right] \quad (2.10)$$

Sin embargo, este proceso no es muy conveniente si se requiere dar una solución confiable y rápida. Por ello, se aplicaron dos métodos numéricos para determinar el valor de P_{so} : el Método del Punto fijo y el Método de la Secante (Chapra, 2004). Sólo se utilizaron estos dos métodos porque otros, como el de Newton Raphson, necesitan la derivada de la función para poder llevar a cabo las iteraciones, y la ecuación para obtener P_{so} es algo compleja para obtener su derivada.

Así, se realizaron diversas pruebas para determinar cuál de los dos métodos seleccionados converge más rápidamente y con más frecuencia, siendo éste el Método de la Secante, por lo que éste se aplicó para dar solución a la ecuación 2.10. Su código está almacenado en la librería de funciones del Sistema: **lib_funciones.php**.

En la Figura 3.5 se muestra la presentación del modelo y los datos requeridos para llevar a cabo la simulación.

Sistema de Análisis de Consecuencias generadas por Incendios y Explosiones PHMSA Normas Mexicanas

SACIE

- Explosión no confinada de una nube de vapor
- Explosión por sobrepresión en un contenedor**
- Radiación Térmica por Bolas de Fuego
- Medidas de seguridad para el manejo de Sustancias Peligrosas
- Módulo de Administración

Explosión por sobrepresión en un contenedor

Es el resultado de una presión excesiva dentro de tanques sellados. Este evento se clasifica como una explosión no térmica.

Cuando el fenómeno se presenta, sucede algo similar a la ruptura de un balón cuando contiene demasiado aire, el tanque estalla completamente.

Procedimiento

SACIE presenta como resultado, distancias de afectación a partir del centro de la explosión con su respectivo valor de sobrepresión. Los resultados se agrupan de acuerdo al nivel de daño que puede encontrarse. Con la finalidad de proporcionar una idea clara de las posibles consecuencias, estos valores son representados en una gráfica de sobre presión contra distancia.

También se presenta una tabla complementaria que contiene a detalle la descripción de los daños que pueden presentarse, en la cual podrá identificar el valor de sobrepresión correspondiente a la distancia que usted indique resultado en color rojo.

Para asegurar la mejor representación de los resultados, por favor elija la unidad en que desea visualizar tanto las distancias (distancia deseada desde el centro de la explosión) como los valores de sobre presión.

Sustancia Química
Acetaldehído

Volumen del tanque
m³

Presión interna
psia

Posición de la explosión sobre el nivel del suelo
Elevada

Forma del tanque
Rectangular

Temperatura interna
°F

Temperatura atmosférica
°F

Presión atmosférica
psia

Distancia deseada desde el centro de la explosión
ft

Unidad deseada para el valor de sobre presión
psia

Simular

Mapa del Sitio | Contacto | ©2007

Figura 3.5 Modelo de explosión por sobre presión en un contenedor

Cuando se selecciona este modelo, el Sistema realiza los siguientes pasos para cumplir con la metodología:

1. Obtiene el valor de R_0 con la ecuación 2.11 y el valor de P_{so} mediante el Método de la Secante.
2. Con el dato de R_0 , SACIE busca en la Base de datos todas las rectas en las que este valor pueda estar contenido. Usando los valores de la pendiente y la ordenada al origen de cada una de estas rectas, se determina cuál de ellas tiene

la distancia más corta al punto formado por (R_0, P_{so}) . El Sistema toma el nombre de la curva a la que pertenece esta recta.

- Usando el nombre de la curva hallado en el paso anterior, y con el valor de R (ecuación 2.12), el Sistema determina los valores de la pendiente y ordenada, tal cómo se realiza al principio del paso 2, para aplicarlos en la ecuación 3.1, la cual determina el valor de sobre presión:

$$P = AR^m \tag{3.1}$$

Así, SACIE presenta como resultado de la simulación una gráfica de valores de Distancia vs Sobre presión tal como se muestra en la siguiente figura:

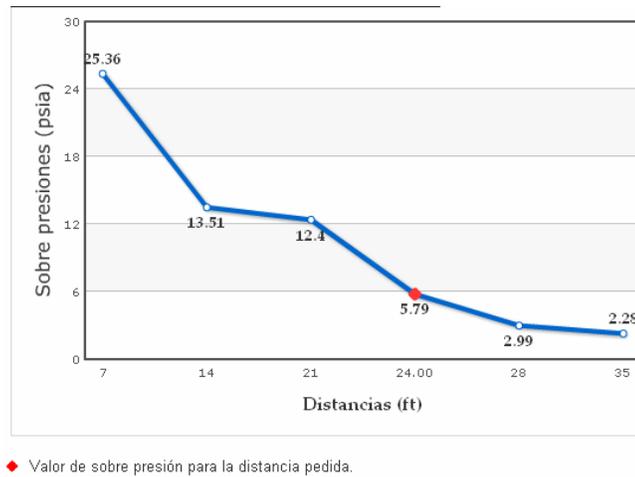


Figura 3.6 Gráfica de distancia vs sobre presión

Las distancias presentadas dependen del valor de la distancia máxima posible a la que puede dar resultado el método. Esta distancia se determina mediante la ecuación 3.2:

$$r_{\max/\min} = R \left[\frac{V \left(\frac{P_i}{P_a} - 1 \right)}{\gamma_i - 1} \right]^{1/3} \tag{3.2}$$

La ecuación anterior permitió determinar la distancia mínima y la máxima posibles a las cuáles se puede determinar un valor de sobre presión. Se obtuvo el valor de estas distancias, ya que, como se mencionó anteriormente, las curvas de la gráfica de Distancia vs Presión adimensionales no pueden dar resultado a ciertas distancias desde el centro de la explosión, ya que esto depende en gran medida del volumen del contenedor y los demás datos de entrada.

Por ello se incluyó en el programa que realiza las simulaciones, las siguientes consideraciones:

- Si la distancia desde el centro de la explosión, ingresada por el usuario, es menor que r_{\min} , se realiza la extrapolación de los valores de la pendiente y de la ordenada al origen de la curva encontrada, correspondientes al menor valor que puede tomar R . Se guarda en la tabla del modelo, *datos_expspt*, el tipo de extrapolación necesaria.
- Si la distancia desde el centro de la explosión es mayor que r_{\max} , se realiza la extrapolación de los valores de la pendiente y de la ordenada al origen de la curva encontrada, correspondientes al mayor valor que puede tomar R . Se guarda en la tabla del modelo, *datos_expspt*, el tipo de extrapolación necesaria.
- Si esta distancia se encuentra dentro del rango determinado por $r_{\min} - r_{\max}$, no se registra ningún tipo de extrapolación.

El archivo **extrapola.php** sólo funciona si al efectuar la simulación, se activa alguno de los tipos de extrapolación.

Modelo de Radiación térmica por bolas de fuego

Este modelo es más sencillo en cuanto a la programación. Sin embargo, la presentación de los resultados tiene cierta complejidad, ya que las zonas en las que tiene impacto la Bola de fuego debían estar bien delimitadas y ser claras para el usuario.

Como se observa en el Diagrama 3.6, la base para todos los cálculos es el dato del peso de la sustancia involucrada en el siniestro. A partir de este valor, el Sistema calcula el tamaño y altura máximas que alcanzará la Bola de fuego, el tiempo que durará, la zona de seguridad y la zona de fatalidades. Cuando la masa excede las 2000 lb, las zonas de intervención y de alto riesgo se calculan de forma diferente a cuando el peso es menor que este valor. La siguiente figura muestra la imagen de este modelo.

The screenshot displays the SACIE software interface. At the top, it reads 'Sistema de Análisis de Consecuencias generadas por Incendios y Explosiones' and 'PHMSA Normas Mexicanas'. The sidebar on the left contains the following menu items: SACIE, Explosión no confinada de una nube de vapor, Explosión por sobrepresión en un contenedor, Radiación Térmica por Bolas de Fuego (highlighted), Medidas de seguridad para el manejo de Sustancias Peligrosas, and Módulo de Administración. The main content area features a photograph of a fire being extinguished. To the right of the photo is the title 'Radiación Térmica por Bolas de Fuego' and two paragraphs of text explaining the phenomenon. Below this is a 'Procedimiento' section with a list of three hazard zones: 'Zonas de alerta' (green), 'Zonas de intervención' (yellow), and 'Zonas de alto riesgo' (red). At the bottom, there are two input fields: 'Peso de la sustancia dentro del recipiente' (with a unit dropdown set to 'lb') and 'Unidad de longitud en que desea ver estas zonas' (with a unit dropdown set to 'ft'). A 'Simular' button is positioned below these fields. The footer contains 'Mapa del Sitio | Contacto | ©2007'.

Figura 3.7 Modelo de radiación por bolas de fuego

El resultado de la simulación es la distancia que alcanza la radiación térmica, la cual se expresa en círculos concéntricos con eje en el foco del incendio así como la Duración del fenómeno. La simulación permite trazar 3 círculos que representan:

- La Zona de riesgo máximo, donde la destrucción es casi total, tanto en bienes inmuebles como en vidas humanas.
- La Zona de intervención, donde sólo pueden permanecer bomberos equipados. La población que no posea el equipo adecuado y que se encuentre en esta zona, puede sufrir daños graves.
- La Zona de alerta. Límite máximo al que pueden acercarse personas sin equipo especial y en la cuál pueden sufrir quemaduras leves de segundo grado.

La idea de presentar los resultados en la forma en que lo hace SACIE surgió a partir de la gran importancia de conocer rápidamente estas tres zonas para tomar las medidas necesarias para el control del evento, como es desalojar a la población expuesta por los efectos que tendrá la radiación en ella además de controlar los efectos del incendio y a él mismo hasta eliminarlo completamente.

Módulo de Administración

Este Módulo es muy importante para el buen funcionamiento de SACIE debido a la confiabilidad de la información. Es muy importante que sólo una persona se haga cargo de su manejo, alguien que funja como Administrador del Sistema.

Por ello, para poder acceder a este módulo, el usuario necesita contar con el permiso correspondiente. En esta etapa del Sistema, sólo la autora de esta tesis cuenta con el permiso de Administrador. Si SACIE fuese implementado en alguna empresa, se

otorgaría este permiso al encargado de administrar el Sistema, el cual debe proporcionar la información correcta para el manejo de las sustancias peligrosas así como sus características físicas y químicas.

Así, en este módulo se pueden llevar a cabo tres actividades básicas:

- Inserción de una nueva Sustancia a la Base de datos,
- Edición de información de una Sustancia ya existente, y
- Eliminación de una Sustancia.

La siguiente figura muestra la pantalla para acceder a este módulo:



The screenshot shows the login interface for the SACIE (Sistema de Análisis de Consecuencias generadas por Incendios y Explosiones) administration module. The page title is "Sistema de Análisis de Consecuencias generadas por Incendios y Explosiones" and the logo "SACIE" is visible. The main heading reads "Bienvenido al Módulo de Administración del Sistema de Análisis de Consecuencias generadas por Incendios y Explosiones (SACIE)". Below this, a prompt asks the user to enter their username and password. There are two input fields: "Nombre de usuario" and "Contraseña", followed by an "Entrar" button. A sidebar on the left lists various system components, with "Módulo de Administración" highlighted. The footer includes "Mapa del Sitio | Contacto | ©2007".

Figura 3.8 Acceso al módulo de administración

Al ingresar al Módulo, el Administrador observará la pantalla que se muestra en la Figura 3.9, en la cual debe elegir qué hacer con la información de las Sustancias Peligrosas.

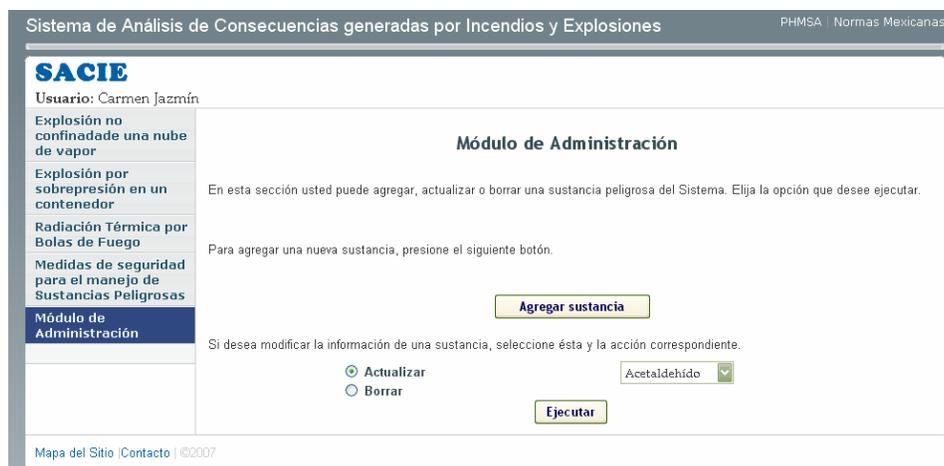


Figura 3.9 Módulo de administración

Esta sección tiene completa interacción con la Base de datos.

Módulo de Medidas de seguridad para el manejo de sustancias peligrosas

En este módulo el usuario puede consultar las Hojas de Informativas de Seguridad para Sustancias Peligrosas: Hojas MSDS, *Material safety data sheets*.

Se consideró muy importante que el Sistema contuviera un módulo de este tipo, ya que al elaborar planes de contingencia se debe contar con toda la información sobre los peligros, riesgos y primeros auxilios en caso de que ocurra un siniestro.

Las hojas MSDS deben estar al alcance de todas las personas que se involucren en el manejo de sustancias peligrosas o que estén expuestas a ellas.

Para que este módulo cumpliera con su cometido, se estudiaron las características que deben tener las hojas de seguridad, y se les asignó un formato amigable para su fácil entendimiento. La siguiente figura muestra la presentación de este módulo.

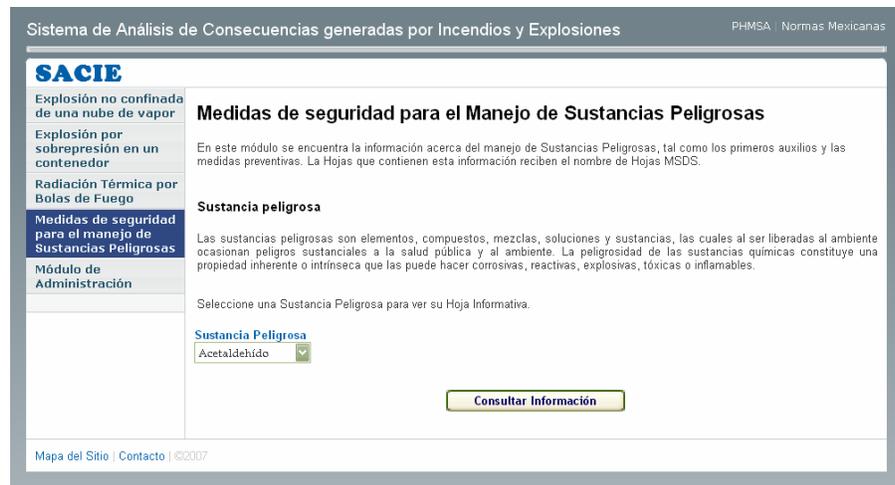


Figura 3.10 Módulo de medidas de seguridad

Para este módulo, se utilizó la librería FPDF, con la cual se generan los documentos PDF que contienen la información presentada en el Sistema sobre las sustancias peligrosas.

3.4 Pruebas aplicadas a SACIE.

Para comprobar el buen funcionamiento del Sistema, se realizaron diversas pruebas. Estas pruebas consistieron en observar que los siguientes elementos fueran correctos:

- El diseño de SACIE y la presentación de resultados, tanto la representación gráfica como la numérica.
- La conversión de unidades.
- La lectura, inserción y actualización de información en la Base de Datos.

Ya que el Sistema incluye muchas consideraciones para las simulaciones y los módulos, se revisó cada una de sus etapas al terminó de su programación. Todo ello para evitar la propagación de errores. Si no se hubiese revisado cada etapa

minuciosamente, al final no se hubieran podido detectar rápidamente las partes que contenían errores.

En esta etapa, también se verificó la validez de los datos de entrada para las simulaciones. Como se dijo antes, se utilizaron validaciones de Javascript para asegurar la confiabilidad de los datos. Se llevaron a cabo diversas pruebas para verificar que efectivamente las validaciones se ejecutan correctamente.

Por ejemplo, en los campos numéricos no se pueden introducir datos alfanuméricos. Si el usuario intenta ingresar letras o símbolos en lugar de números, automáticamente aparecerá un mensaje de “Advertencia” donde se indica que el dato no es válido, además de exhortar al usuario a ingresar uno válido.

La siguiente figura muestra el mensaje que aparece al ingresar la cadena “AEI” en el campo del *Peso Masa del recipiente* del modelo de Radiación térmica por bolas de fuego:

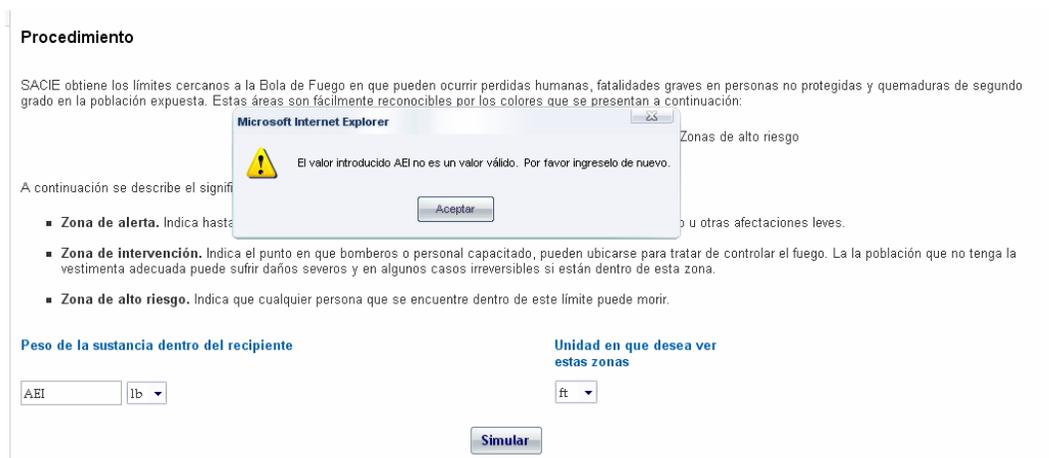


Figura 3.11 Mensaje de advertencia sobre un dato equivocado

Además, se valida que todos los campos contengan datos, ya que es de vital importancia que éstos existan para realizar los cálculos matemáticos. La Figura 3.12 muestra el mensaje que aparece al intentar “Simular” sin ingresar datos:

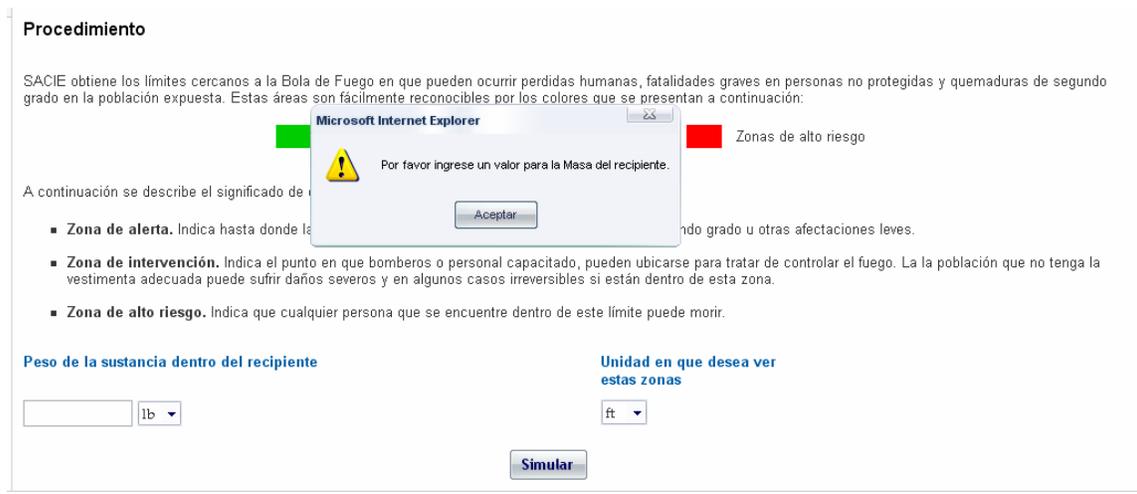


Figura 3.12 Mensaje que advierte que se están enviando campos en blanco

En todos los modelos y módulos de SACIE, se lleva a cabo la verificación de los datos de entrada.

Después de realizar las verificaciones, se revisó que las gráficas contuvieran los datos correctos. Anteriormente se explicó la razón del uso de las gráficas de FusionCharts ya que las PHP-SWF no permitían un cambio dinámico de los datos, esto se detectó al verificar que efectivamente la gráfica contuviese la información correcta.

En lo referente a la conversión de unidades, primero se comprobó la conexión con la tabla de *unidades*. Posteriormente, al obtener los resultados de las simulaciones, se cambió la unidad deseada de entrada para representarlos. Se usó un conversor de unidades para comparar los resultados de la simulación previa con los de la nueva simulación. De esta manera, se comprobó que las conversiones son correctas.

Para la comprobación de la conexión y manejo correctos de la Base de datos, en un primer momento, fue suficiente observar la presentación de cada modelo y de sus resultados. Esto, ya que en los formularios de entrada se realiza la consulta de campos de diferentes tablas, como *unidades* y *sustancias químicas*. Si estos campos no se mostraban adecuadamente, significaba que la consulta a la Base de datos no estaba funcionando.

Luego, para verificar que la inserción y actualización de datos en *atom* se estaba efectuando se realizó lo siguiente:

1. Simulación.
2. Se verificó que los datos se insertarán correctamente en la tabla correspondiente.
3. Se cambió un dato de entrada y ejecutó de nueva cuenta la simulación.
4. Se verificó que el dato de prueba se actualizara en la prueba correspondiente.

A continuación se muestra un ejemplo de este procedimiento:

1. Simulación.



Figura 3.13 Simulación de una explosión no confinada de una nube de vapor

2. Datos insertados en la tabla *datos_expnc*.

<input type="checkbox"/>			13	Elevada	4005	Btu/lb	3444 lb	1	315.27425
--------------------------	--	--	----	---------	------	--------	---------	---	-----------

Figura 3.14 Vista de la tabla *datos_expnc* con el dato recién insertado

3. Modificación del dato y unidad del peso de la masa explosiva del gas.



Figura 3.15 Nueva Simulación de la explosión no confinada de una nube de vapor

4. Dato actualizado en la tabla correspondiente.

<input type="checkbox"/>			13	Elevada	4005	Btu/lb	500 kg	1	215.65890
--------------------------	--	--	----	---------	------	--------	--------	---	-----------

Figura 3.16 Vista de la tabla *datos_expnc* con el dato modificado

3.5 Operación y crecimiento futuro.

Si SACIE se llega a implementar en una empresa, tendría que almacenarse en el Servidor que le da servicio a ésta, el cual debe contar con el software necesario para su buen funcionamiento, en este caso: Servidor Apache y la base de datos MySQL. Se le debe asignar al Sistema una dirección electrónica del intranet para que los empleados puedan acceder a él. Así mismo, se debe designar a una persona que funja como Administrador del Sistema, el cual anexará la información de Sustancias químicas que la empresa requiera, o bien editar la información que ya se encuentra disponible.

Ya que SACIE sólo incluye tres de los modelos de ARCHIE, en un futuro alguien puede continuar con su programación e incluir los modelos restantes para la evaluación de riesgos, así mismo, pueden adecuarse el tipo de gráficas y la presentación de los resultados. Para ello, sólo deben comunicarse con la autora de esta tesis al correo cjazz705@gmail.com.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Escenarios generados por SACIE.

SACIE genera tres escenarios principales para la representación de los daños ya sea por incendios o por explosiones. Además, da al usuario la posibilidad de consultar las Hojas Informativas de Sustancias Peligrosas, las cuales contienen los peligros, riesgos, características físicas y químicas, etc., de diversas Sustancias.

En todos los escenarios hay elementos comunes ubicados en partes específicas de la página. Esto debido al diseño que se eligió para el Sistema:

- En la parte superior derecha aparecen dos ligas importantes:
 1. PHMSA. Contiene el hipervínculo a la página de donde se obtuvo el programa y documentación de ARCHIE.
 2. Normas Mexicanas. Es vínculo hacia las Normas Mexicanas vigentes para el manejo de Sustancias peligrosas y del Cuidado del Medio Ambiente.
- En el lado izquierdo está el Menú de todas las secciones del Sistema. Al ubicarse en cierta sección del Sistema, está es resaltada en el menú.
- En la parte central se describe el modelo o sección en la que se está ubicado, o bien, los resultados de una simulación o consulta de información.
- Aparecen “tips” del llenado de datos al posicionar el cursor sobre el dato de entrada que es requerido.
- En el caso de los escenarios que representan los resultados de las simulaciones:
 - Aparece una sección del lado derecho en la que se encuentran los datos de entrada del modelo para que puedan ser modificados y así realizar una nueva simulación.

- Al centro se ubica una gráfica con los resultados, y posteriormente, una tabla de daños o datos extras.

Estos escenarios se generan luego de introducir los datos de entrada para cada modelo.

A continuación se describen los escenarios de los modelos y módulos de SACIE.

Escenario para el modelo de Explosión no confinada de una nube de vapor.

La siguiente figura muestra el resultado de la simulación realizada:

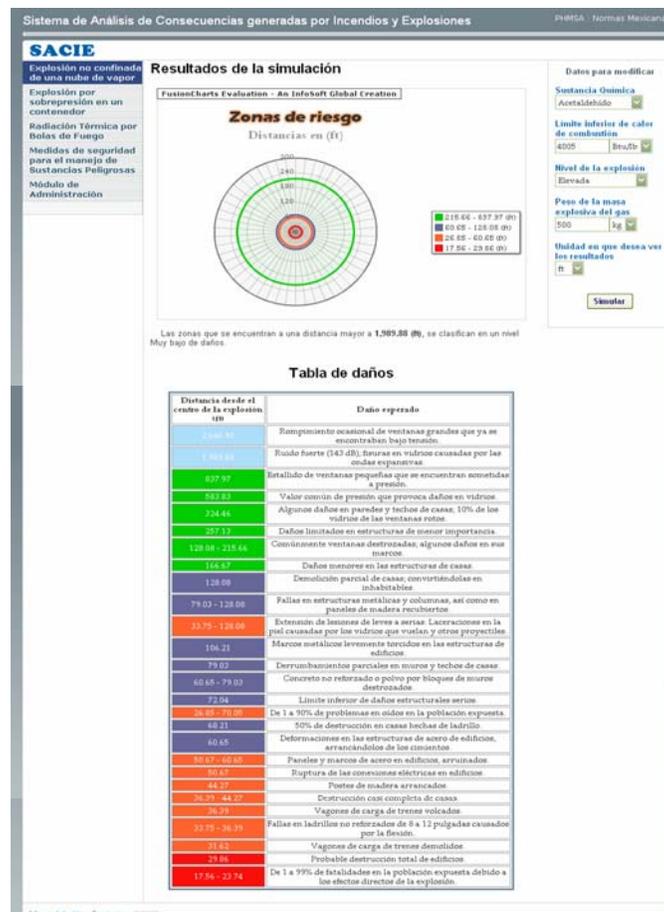


Figura 4.1 Resultados del modelo de explosión no confinada de una nube de vapor

La gráfica representa las zonas que están en riesgo. Estas zonas se clasifican en 5 según el nivel de daño:

1. Muy bajo
2. Bajo
3. Mediano
4. Alto
5. Muy alto

Y cada una se identifica por un color y la leyenda contiene los valores que las delimitan. La gráfica utilizada es de tipo polar. Además, se presenta una tabla complementaria de daños en donde se detallan éstos.

Escenario para el modelo de Explosión no confinada de una nube de vapor.

Luego de realizar la simulación correspondiente, se observa el siguiente escenario:

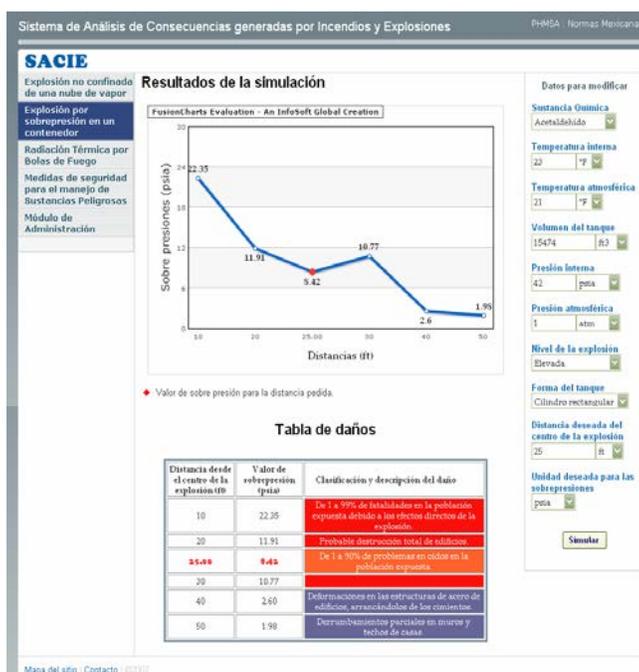


Figura 4.2 Resultados del modelo de explosión por sobre presión en un contenedor

El valor de sobre presión para la distancia pedida por el usuario se incluye en la gráfica con una marca especial que lo identifica de los demás así como una leyenda bajo la gráfica que lo describe.

Al igual que en el caso de la Explosión no confinada de una nube de vapor, SACIE muestra una tabla pequeña con la descripción de daños por sobre presión, donde también se resalta el resultado de la simulación para el valor de la distancia pedida.

Este modelo tiene más variantes que los otros dos. Por ejemplo, si la distancia que introduce el usuario excede la distancia máxima a la que el modelo puede dar un resultado correcto, se presentará el siguiente mensaje:

SACIE ha encontrado que la distancia máxima a la que puede determinar un valor válido de sobre presión es: **37.162 (ft)** con un valor de **1.94 (psia)** . Los valores de sobre presión son más pequeños para las distancias mayores a ésta.

Sin embargo, si usted lo desea, se pueden extrapolar los valores teóricos para hallar el valor de sobre presión correspondiente a la distancia que desea, quedando bajo su responsabilidad la interpretación de este valor.

Un botón rectangular con esquinas redondeadas, con un borde azul y el texto "Extrapolar" en azul.

Figura 4.3 Mensaje que avisa cuál es la distancia máxima

Por otra parte, la Figura 4.4 muestra el mensaje que aparece si la distancia introducida es menor a la distancia mínima a la que se puede determinar un valor de sobre presión.

SACIE ha encontrado que la distancia mínima a la que puede determinar un valor válido de sobre presión es: **6.503 (ft)** con un valor de **99.58 (psia)** . Los valores de sobre presión son muy altos para las distancias menores a ésta. El nivel de daños es fatal.

Sin embargo, si usted lo desea, se pueden extrapolar los valores teóricos para hallar el valor de sobre presión correspondiente a la distancia que desea, quedando bajo su responsabilidad la interpretación de este valor.

Un botón rectangular con esquinas redondeadas, con un borde azul y el texto "Extrapolar" en azul.

Figura 4.4 Mensaje que avisa cuál es la distancia mínima

A presionar el botón *Extrapolar*, se activa el archivo **extrapola.php**, en el cual contiene el código para llevar a cabo la extrapolación de los valores de la gráfica de Distancia vs Presión adimensional. De este proceso se genera el siguiente resultado:

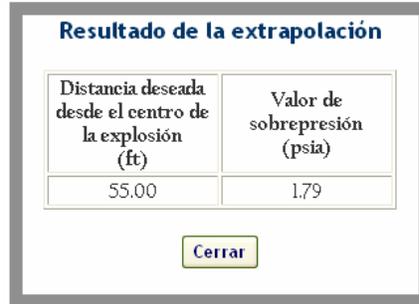


Figura 4.5 Pantalla de extrapolación

Escenario para el modelo de Radiación térmica por bolas de fuego.

La siguiente figura muestra el escenario resultado para este modelo:

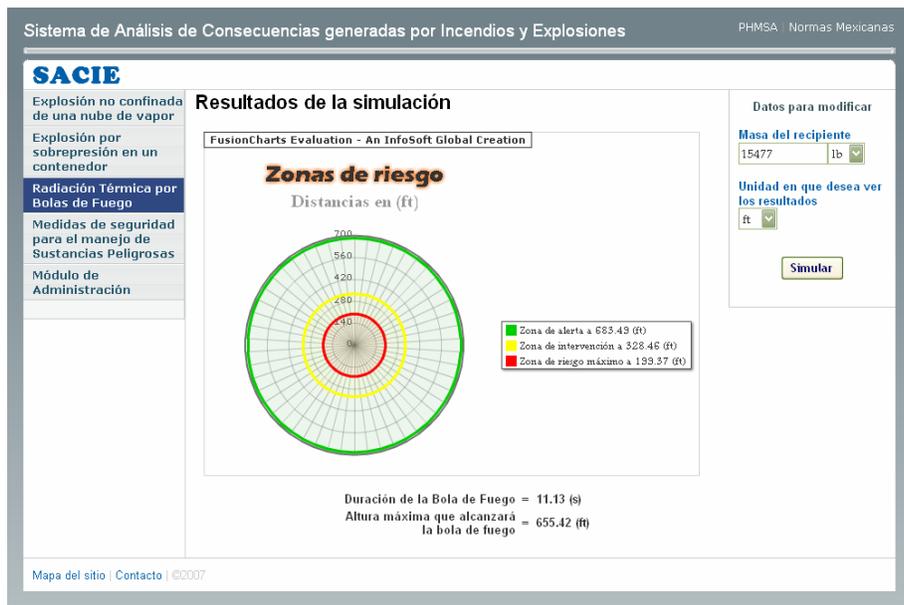


Figura 4.6 Resultados del modelo de radiación térmica por bolas de fuego

Al igual que el modelo de Explosión no confinada de una nube de vapor, este escenario presenta una gráfica de tipo polar. En este caso, se representan tres zonas:

1. **Zona de alerta.** Indica hasta donde las personas expuestas pueden sufrir quemaduras de segundo grado u otras afectaciones leves.
2. **Zona de intervención.** Indica el punto en que bomberos o personal capacitado, pueden ubicarse para tratar de controlar el fuego. La población que no tenga la vestimenta adecuada puede sufrir daños severos y en algunos casos irreversibles si están dentro de esta zona.
3. **Zona de alto riesgo.** Indica que cualquier persona que se encuentre dentro de este límite puede morir.

Además, SACIE calcula el tiempo que durará la bola de fuego y la altura máxima que alcanzará la bola de fuego, los cuales son presentados en la parte inferior del resultado.

Módulo de Administración.

Como se mencionó en el Capítulo 3, este módulo es el soporte para el funcionamiento correcto de SACIE.

Si el usuario no cuenta con el permiso necesario para ingresar al Sistema, o bien, tecleó mal el nombre de usuario y/o contraseña, aparece el mensaje mostrado en la Figura 4.7.



Figura 4.7 Mensaje de usuario no registrado

Luego de que el Administrador introduce correctamente sus datos, se pueden llevar a cabo las siguientes acciones:

Agregar una sustancia al Sistema

Cuando se requiere agregar una Sustancia Peligrosa, se debe presionar el botón *Agregar sustancia*. Inmediatamente aparece la pantalla de la Figura 4.8, en la cuál el administrador debe ingresar la información referente a la sustancia. Obviamente esta información debe ser confiable.

Sistema de Análisis de Consecuencias generadas por Incendios y Explosiones PHMSA Normas Mexicanas

SACIE

Usuario: Carmen Jazmín

Explosión no confinada de una nube de vapor
Explosión por sobrepresión en un contenedor
Radicación Térmica por Bolas de Fuego
Medidas de seguridad para el manejo de Sustancias Peligrosas

Módulo de Administración

En esta sección se puede agregar al Sistema una Sustancia Peligrosa con sus características y las medidas de seguridad para su manejo.
Todos los campos son obligatorios.

Nombre

Fórmula química

Otros nombres conocidos

Descripción

Factor de rendimiento

Cociente de calor específico

Descripción de Riesgos

Descripción de Peligros físicos y químicos

Precauciones para evitar accidentes

Propiedades físicas y químicas

Manipulación en caso de derrame y almacenamiento

Medidas para la lucha contra incendios

Efectos en la salud por exposición a la sustancia

Simbología

<input type="checkbox"/> 	<input type="checkbox"/> 
<input type="checkbox"/> 	<input type="checkbox"/> 
<input type="checkbox"/> 	<input type="checkbox"/> 
<input type="checkbox"/> 	<input type="checkbox"/> 
<input type="checkbox"/> 	<input type="checkbox"/> 

Riesgos en la salud

Via de exposición	Prevención de riesgos por contacto	Sintomas de daños por exposición	Primeros auxilios
Inhalación	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Piel	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Ojos	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Ingestión	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Mapa del Sitio | Contacto | ©0007

Figura 4.8 Formulario para agregar una sustancia peligrosa

Al terminar de ingresar la información, se debe oprimir el botón *Agregar sustancia*. Si ésta fue agregada al sistema aparecerá el siguiente mensaje:

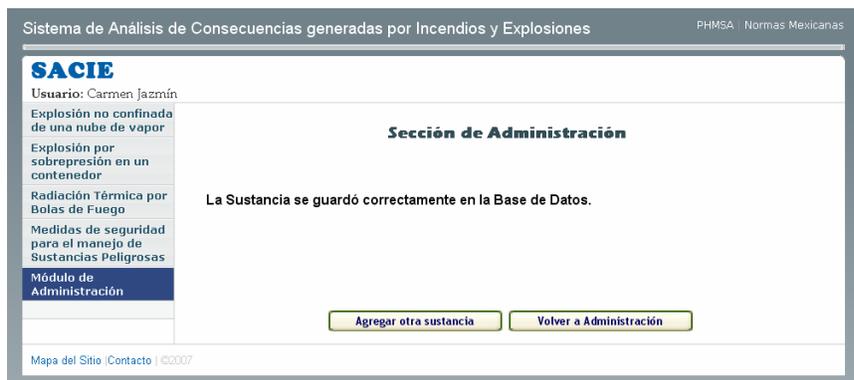


Figura 4.9 Mensaje de inserción exitosa

Desde esta página se puede agregar otra sustancia o regresar a la página principal de Administración.

Modificar una sustancia ya existente en el Sistema

Para actualizar la información de una sustancia peligrosa, el administrador debe seleccionar la opción *Actualizar*, el nombre de ella y oprimir el botón *Ejecutar*, tal como se muestra en la siguiente figura:



Figura 4.10 Selección para actualizar la información de una sustancia peligrosa

A continuación aparece un formulario igual al que se presenta para agregar una Sustancia, pero este contiene la información actual de la sustancia seleccionada para que ésta pueda ser editada.

Sistema de Análisis de Consecuencias generadas por Incendios y Explosiones PHMGA Normas Mexicanas

SACIE

Usuario: Carmen Jaizán

Explosión no confinada de una nube de vapor

Explosión por sobrepresión en un contenedor

Radiación Térmica por Bolas de Fuego

Medidas de seguridad para el manejo de Sustancias Peligrosas

Módulo de Administración

En esta sección se edita la información de la Sustancia Peligrosa.

Todos los campos son obligatorios.

Nombre
Acetaldehído

Fórmula química
CH₃COH

Otros nombres conocidos
Etanal
Aldehído acético
Etil aldehído

Descripción
Es un líquido volátil, incoloro y con un olor característico ligeramente afrutado.

Factor de rendimiento
0.02

Cociente de calor específico
1.3

Descripción de Riesgos
Esta sustancia es extremadamente inflamable.
Las mezclas vapor/aire son explosivas.

Descripción de Peligros físicos y químicos
El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. La sustancia puede formar peróxidos explosivos en contacto con el aire. El Acetaldehído puede polimerizar bajo la influencia de ácidos, materiales alcalinos y bajo la

Precauciones para evitar accidentes
Evitar las llamas, no producir chispas y no fumar. No poner a la sustancia en contacto con superficies calientes.
Contar con un sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión.
Utilicen herramientas manuales no

Propiedades físicas y químicas
Punto de ebullición: 20.2°C
Punto de fusión: -123°C
Densidad relativa (agua = 1): 0.78
Solubilidad en agua: Miscible
Presión de vapor: kPa a 20°C: 101
Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.5
Punto de inflamación: -38°C

Manipulación en caso de derrame y almacenamiento
Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes precintados; absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro.
No absorber la sustancia con aserrín u otros absorbentes combustibles.

Medidas para la lucha contra incendios
Los bomberos deberían emplear indumentaria de protección completa, incluyendo equipo autónomo de respiración.
Se debe usar polvo, espuma resistente al alcohol, agua en grandes cantidades o dióxido de carbono para combatir el fuego.

Efectos en la salud por exposición a la sustancia
La sustancia irrita los ojos, la piel y el tracto respiratorio.
La inhalación del vapor puede originar edema pulmonar.
Puede causar efectos en el sistema nervioso central, dando lugar a disminución de la consciencia.
Los efectos pueden aparecer de forma

Simbología

Riesgos en la salud

Vía de exposición	Prevención de riesgos por contacto	Síntomas de daños por exposición	Primeros auxilios
Inhalación	Ventilación. Extracción localizada o protección	Toe, somnolencia, jadeo, pérdida del conocimiento. Los síntomas del	Aire limpio, reposo, posición de semisupino.
Piel	Uso de gafas ajustadas de seguridad o protección ocular	Enrojecimiento, dolor, visión borrosa.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las
Ojos	Uso de guantes protectores y traje de protección.	Enrojecimiento, sensación de quemazón, dolor.	Quitar las prendas de vestir contaminadas, aclarar y lavar la
Ingestión	No comer, beber o fumar durante el trabajo.	Sensación de quemazón, diarrea, vértigo, náuseas y vómitos. También	Enjuagar la boca, dar a beber agua abundante.

Mapa del Sitio | Contacto | ©2007

Figura 4.11 Información para actualizar una sustancia peligrosa

Para guardar los cambios en la información, se debe oprimir el botón *Modificar Información*. El proceso es el mismo que para agregar una sustancia. Si la actualización se realiza de forma correcta, aparece el siguiente mensaje:

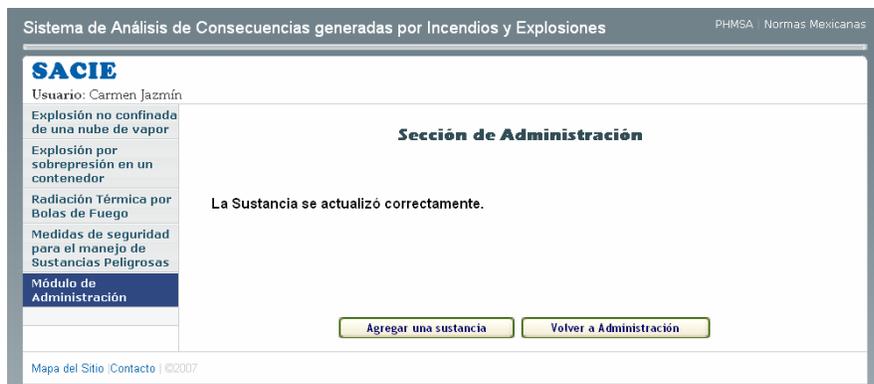


Figura 4.12 Mensaje de actualización exitosa

Desde aquí se puede ir a la sección para agregar una sustancia o bien regresar a la página principal del Módulo de Administración.

Eliminar una sustancia ya existente del Sistema

Si es necesario borrar una sustancia del Sistema, el administrador debe seleccionar las siguientes opciones mostradas en la siguiente figura:

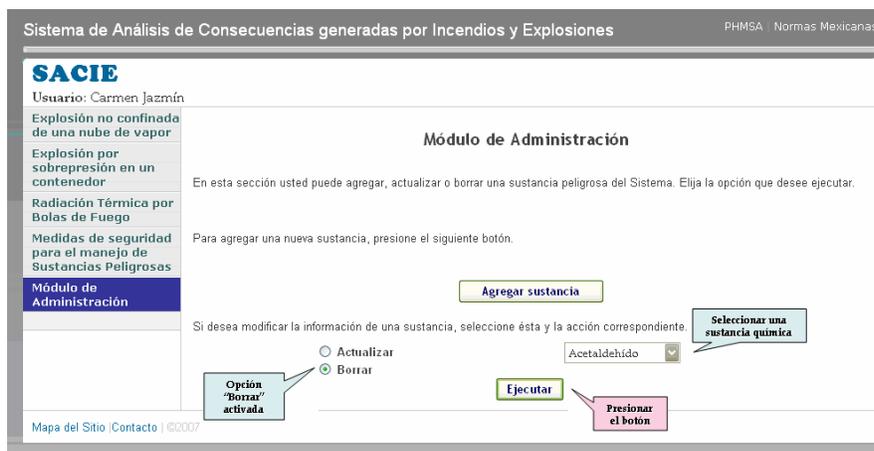


Figura 4.13 Eliminar una sustancia peligrosa de SACIE

Si la sustancia es eliminada de SACIE, aparece el siguiente mensaje:

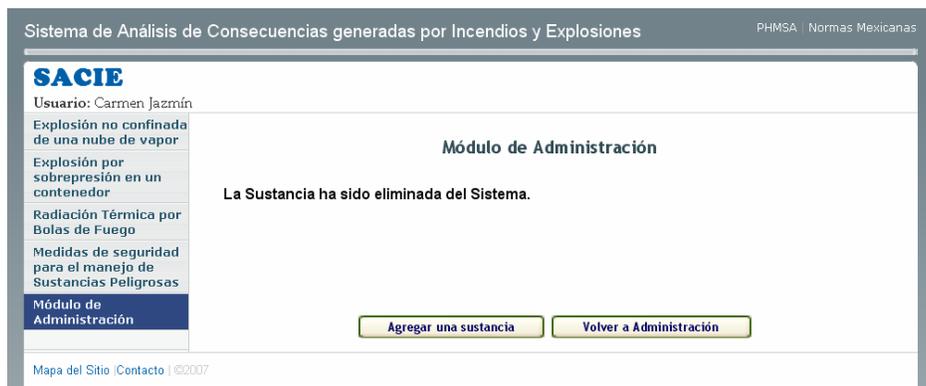


Figura 4.14 Mensaje de eliminación exitosa

Desde aquí se puede ir a la sección para agregar una Sustancia o bien regresar a la página principal de l Módulo de Administración.

Módulo de Medidas de seguridad para el manejo de sustancias peligrosas.

Este módulo es muy importante ya que le muestra al usuario toda la información referente a las propiedades químicas y físicas de una sustancia. Esta información es vital para la creación de los planes de contingencia.

Luego de elegir la sustancia peligrosa, en la pantalla mostrada en la Figura 3.10, debe oprimirse el botón *Consultar Información*. A continuación aparece la hoja informativa de la sustancia elegida. Como un ejemplo de consulta, en la Figura 4.13 se observa la Hoja MSDS del Acetaldehído.

Sistema de Análisis de Consecuencias generadas por Incendios y Explosiones PHMSA / Normas Mexicanas

SACIE

Explosión no confinada de una nube de vapor
 Explosión por sobrepresión en un contenedor
 Radiación Térmica por Bolas de Fuego

Medidas de seguridad para el manejo de Sustancias Peligrosas

Módulo de Administración

Versión pdf

Consultar otra MSDS

Acetaldehído

Consultar

Hoja MSDS del Acetaldehído

Datos Generales

Fórmula Química: CH₃COH
 Otros nombres: Etanol, Aldehído acético, Etil aldehído

Identificación de la sustancia: Es un líquido volátil, incoloro y con un olor característico ligeramente afutado.

Identificación de Riesgos y Peligros

Riesgos:

- Esta sustancia es extremadamente inflamable.
- Las mezclas vapor/aire son explosivas.

Peligros:

- El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo, posible ignición en punto distante.
- La sustancia puede formar peróxidos explosivos en contacto con el aire.
- El Acetaldehído puede polimerizar bajo la influencia de ácidos, materiales alcalinos y bajo la presencia de trazas metálicas, con peligro de incendio o explosión.
- Es un agente reductor fuerte y reacciona violentamente con oxidantes, originando peligro de incendio y explosión.

Propiedades Físicas y Químicas

- Punto de ebullición: 20.2°C
- Punto de fusión: -123°C
- Densidad relativa (agua = 1): 0.78
- Solubilidad en agua: Miscible
- Presión de vapor, kPa a 20°C: 101
- Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.5
- Punto de inflamación: -38°C
- Temperatura de autoignición: 185°C
- Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 4-60
- Coefficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 0.63

Información de riesgos en la salud por exposición

- La sustancia irrita los ojos, la piel y el tracto respiratorio.
- La inhalación del vapor puede originar edema pulmonar.
- Puede causar efectos en el sistema nervioso central, dando lugar a disminución de la consciencia.
- Los efectos pueden aparecer de forma no inmediata.
- El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis.
- Puede afectar al sistema nervioso central, al tracto respiratorio y a los riñones, dando lugar a una intoxicación similar al alcoholismo crónico.
- Esta sustancia es posiblemente carcinógena para los seres humanos.

A continuación se da un detalle del cuidado personal:

Tipo de Exposición	Prevención	Síntomas agudos	Primeros auxilios
Inhalación	Ventilación. Extracción localizada o protección respiratoria.	Tos, somnolencia, jadeo, pérdida del conocimiento. Los síntomas del edema pulmonar no se ponen de manifiesto, a menudo, hasta pasadas algunas horas y se ven agravados por el esfuerzo físico. Reposo y vigilancia médica son, por ello, imprescindibles.	Aire limpio, reposo, posición de semincorporado.
Ojos	Uso de guantes protectores y traje de protección.	Enrojecimiento, sensación de quemazón, dolor.	Quitar las prendas de vestir contaminadas, aclarar y lavar la piel con agua y jabón.
Piel	Uso de gafas ajustadas de seguridad o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enrojecimiento, dolor, visión borrosa.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto, si puede hacerse con facilidad).
Ingestión	No comer, beber o fumar durante el trabajo.	Sensación de quemazón, diarrea, vértigo, náuseas y vómitos. También se relacionan los efectos por inhalación.	Enjuagar la boca, dar a beber agua abundante.

Precauciones para un manejo y uso seguros

- Evitar las llamas, no producir chispas y no fumar. No poner a la sustancia en contacto con superficies calientes.
- Contar con un sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas.
- Evacuar la zona de peligro.
- Eliminar las fuentes de ignición.

Manipulación y almacenamiento

- Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes precintables, absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro.
- No absorber la sustancia con aserrín u otros absorbentes combustibles. Eliminar el vapor con agua pulverizada.
- No permitir que este producto químico se incorpore al ambiente.
- Protección personal complementaria: Filtro respiratorio para vapores orgánicos y gases.
- La sustancia debe almacenarse en un contenedor a prueba de incendio.
- Debe estar etiquetado.
- Mantenerlo en la oscuridad, almacenar solamente si el material está estabilizado.
- La adición de estabilizadores o inhibidores podría influir sobre las propiedades toxicológicas de esta sustancia; consultar a un experto.

Medidas de control en caso de incendio

- Los bomberos deberían emplear indumentaria de protección completa, incluyendo equipo autónomo de respiración.
- Se debe usar polvo, espuma resistente al alcohol, agua en grandes cantidades o dióxido de carbono para combatir el fuego.
- Mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociándolas con agua.

Mapa del Sitio | Contacto | ©2017

Figura 4.15 Hoja MSDS del Acetaldehído

Bajo el menú del lado izquierdo, se presenta la opción de consultar la Hoja MSDS de otra sustancia peligrosa.

También aparece un botón que permite ver la Hoja MSDS en formato PDF, así el usuario puede imprimir esta información, o bien, guardarla. El documento aparecerá en una ventana adicional. La siguiente figura muestra la pantalla que aparece al consultar la “Versión pdf” del Acetaldehído.

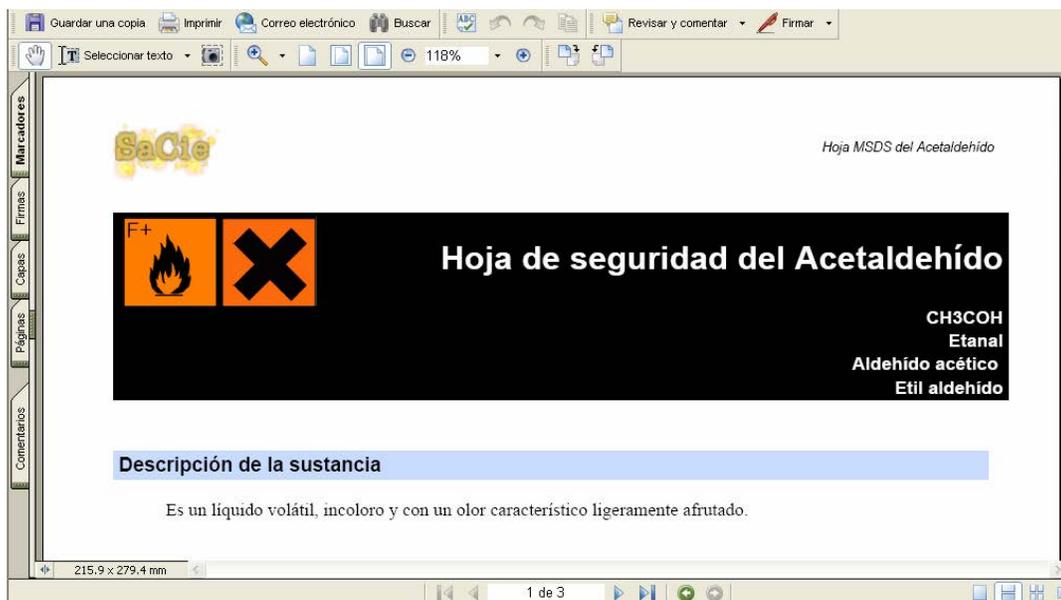


Figura 4.16 Documento PDF del Acetaldehído

4.2 Comparación de los resultados obtenidos en las pruebas aplicadas a SACIE con los generados por ARCHIE.

SACIE genera escenarios gráficos y fáciles de utilizar a diferencia de ARCHIE. Este último muestra sus resultados por medio de texto en pantallas de MS-DOS.

En primera instancia, ARCHIE no cuenta con un módulo para su Administración ni con una Base de datos. El usuario tiene que ingresar todos los datos necesarios para realizar las simulaciones, incluso aquellos que son características más específicas de las Sustancias químicas, como lo es el cociente de calor específico, c_p/c_v .

En la siguiente figura aparece el menú de ARCHIE para la elección de un modelo.

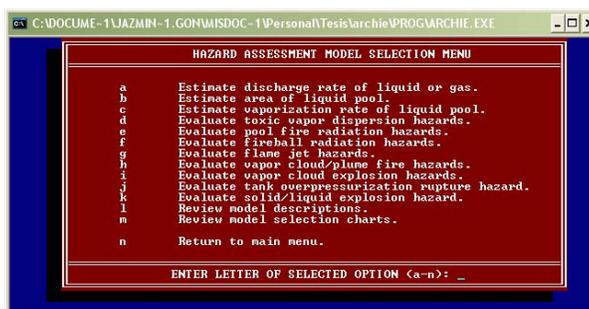


Figura 4.17 Menú de ARCHIE

Una vez que se selecciona un modelo, se tiene que terminar el ingreso de sus datos de entrada, ya que ARCHIE no ofrece la posibilidad de cambiar de un modelo a otro en el proceso de recabación de datos. En contraste con SACIE el usuario sí puede cambiar de un modelo a otro cuando lo desee.

Otra clara ventaja de SACIE sobre ARCHIE, es que el primero solicita los datos para la simulación en una sola pantalla, los describe y los utiliza para la simulación mientras que ARCHIE solicita dato por dato, lo que puede llegar a ser tedioso para un usuario que necesita un rápido resultado. Por ejemplo, en la siguiente figura se muestra la solicitud de peso del material contenido en un tanque para el modelo de Radiación térmica por bolas de fuego:

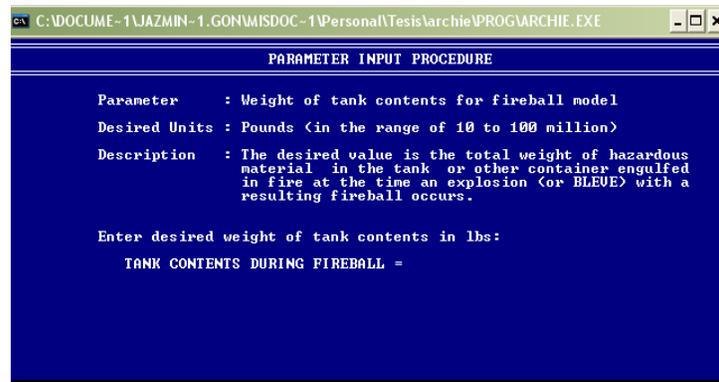


Figura 4.18 Solicitud del peso del material peligroso

Como se observa, sólo se puede ingresar un solo dato por pantalla, volviendo lenta la simulación.

Por otro lado, ARCHIE requiere que los datos de entrada estén en unidades específicas para realizar los cálculos matemáticos. En cambio, SACIE ofrece al usuario la posibilidad de introducir estos en diferentes unidades. Este inconveniente de ARCHIE también está latente en la presentación de resultados.

A continuación se muestran los resultados que arroja ARCHIE para dos de los modelos que contiene SACIE.

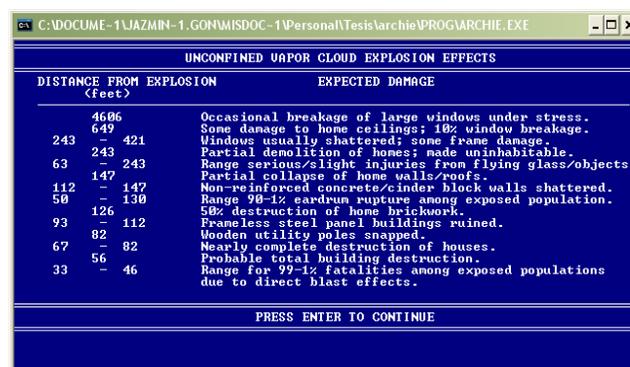


Figura 4.19 Resultados del modelo de explosión no confinada de una nube de vapor

```
C:\DOCUME~1\JAZMIN-1\GONWISDOC-1\PersonalTesis\archie\PROG\ARCHIE.EXE
CURRENT PARAMETER VALUES FOR FIREBALL
RADIATION ESTIMATION METHOD

TANK CONTENTS DURING FIREBALL = 15400 lbs
Want to change the weight <Y/N or <cr>>? n

MODEL RESULTS:
Maximum fireball diameter = 397 feet
Maximum fireball height = 653 feet
Fireball duration = 11.2 seconds
Fatality zone radius = 328 feet
Injury zone radius = 682 feet

WARNING: Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions (BLEVEs)
may cause high velocity tank fragments to travel
considerable distances. Some tanks, especially
horizontal cylindrical types, may rocket while
spewing forth flames.

Want to rerun the model with different input values <Y/N or <cr>>?
```

Figura 4.20 Resultados del modelo de radiación térmica por bolas de fuego

En el primero de estos escenarios se observan sólo los datos numéricos con la descripción del daño posible. Los resultados del Modelo de sobre presión en un contenedor tienen el mismo formato. En contraste, SACIE también muestra una tabla de daños, pero son para complementar los resultados de su gráfica, además, su tabla contiene más datos.

En el caso del modelo de radiación térmica por bolas de fuego, ARCHIE arroja simples longitudes y el tiempo de duración del la bola de fuego. Para que estos resultados tengan sentido en la simulación de riesgos, el usuario debe conocer con exactitud su significado.

Conclusiones

A lo largo del desarrollo del presente trabajo, se comprendieron los efectos que pueden tener la ocurrencia accidental de incendios y explosiones, así como los riesgos que implican. Se buscó representar sus resultados de forma sencilla y atractiva para los posibles usuarios, por lo que se seleccionaron las herramientas que permitieran lograr ese propósito, como lo fue el software utilizado y las librerías:

- FPDF, para la generación de documentos PDF;
- FusionCharts, para crear las gráficas.

Es fundamental para el Sistema contar con suficiente información respecto a las sustancias químicas que pueden estar involucradas en accidentes que originen un incendio o explosión, ya que sin ella el SACIE no funcionaría adecuadamente. Esto también va de la mano con un buen diseño de la Base de datos y la planeación para el desarrollo de la programación así como las pruebas del funcionamiento de éste, con todo lo que esto implica.

También, como parte importante de la elaboración del Sistema desarrollado en este trabajo, se compararon los resultados arrojados por ARCHIE con los de éste, lo cual se puede apreciar en las figuras de resultados presentadas en el capítulo 4 referentes a los modelos tanto de SACIE como de ARCHIE.

En el caso del modelo de radiación térmica por bolas de fuego, se notó más la similitud de resultados que con los otros modelos estudiados, aunque existen pequeñas diferencias por el redondeo de cifras.

Para la explosión no confinada de una nube de vapor, los datos de las tablas difieren aún más. Sin embargo, esto se debe a que ARCHIE simula los modelos con cifras redondeadas (esto se comprobó al efectuar pruebas en SACIE con los datos redondeados cuando se desarrolló el código), y éste último no lo hace.

A partir de todas estas premisas, SACIE tiene las siguientes ventajas frente a ARCHIE:

- Ofrece escenarios gráficos y de colores.
- Los datos de entrada se recaban en una sola pantalla.
- Se pueden cambiar uno o más datos de entrada en la página de resultados.
- Ofrece una interpretación de los resultados para que el usuario pueda digerirlos fácilmente.
- Contiene el módulo de Administración para agregar, actualizar o eliminar Sustancias Químicas.
- Tiene el módulo de Medidas de Seguridad para el manejo de Sustancias Peligrosas que provee de información útil para la elaboración de planes de contingencia y la actuación en caso de siniestros.
- Resultados más certeros, ya que SACIE realiza los cálculos con varios decimales (PHP trabaja con 14 decimales de precisión).

Claramente, como se puede observar en el desarrollo de esta tesis, SACIE ofrece ventajas visuales en comparación con ARCHIE, y mejoras considerables como lo son el módulo de Administración y el Módulo de Medidas de Seguridad para el manejo de Sustancias Peligrosas, con lo que esta tesis cumple con su cometido de darle al usuario una herramienta económica y fácil de utilizar desde cualquier lugar. Con toda la información que genera SACIE, es posible desarrollar planes de contingencia adecuados a las necesidades de situaciones particulares.

SACIE funciona correctamente para la evaluación de daños por explosiones e incendios.

Para su implementación, basta con tenerlo instalado en una PC junto con la versión de Apache, PHP y MySQL, tal como se desarrolló en este trabajo. Sin embargo, el Sistema puede montarse en un Servidor de Internet para que cualquier usuario pueda acceder a él desde cualquier punto del mundo.

Anexo 1. Métodos Numéricos.

Método de la Secante

El Método de la Secante se deriva del método de Newton Raphson, el cuál presenta un problema potencial en su implementación: el cálculo de una derivada. Aunque esto no es un inconveniente para los polinomios, existen algunas funciones cuyas derivadas en ocasiones, resultan muy difíciles de calcular. En dichos casos, la derivada se puede aproximar mediante una diferencia finita dividida hacia atrás, como puede observarse en la Figura A1.1.

$$f'(x_i) \equiv \frac{f(x_{i-1}) - f(x_i)}{x_{i-1} - x_i} \quad (\text{A1.1})$$

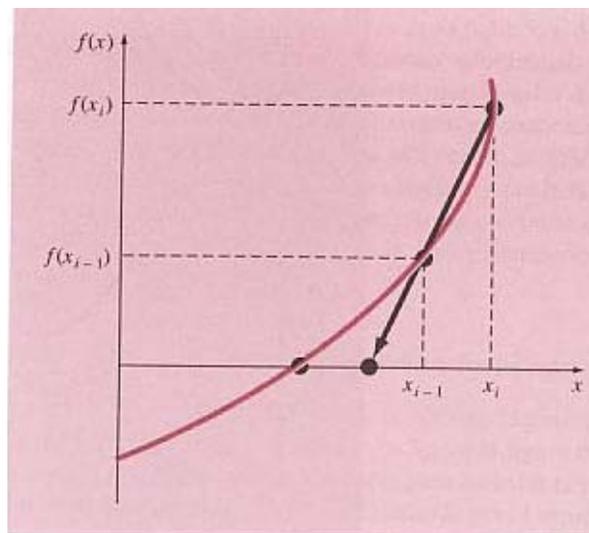


Figura A1.1. Representación Gráfica del método de la secante

Esta aproximación se sustituye en la ecuación (A1.1) para obtener la siguiente ecuación interactiva:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)(x_{i-1} - x_i)}{f(x_{i-1}) - f(x_i)} \quad (\text{A1.2})$$

Esta última ecuación, es la fórmula para el método de la secante. Puede observarse que el método requiere de dos valores iniciales de x . Sin embargo, debido a que no se necesita que $f(x)$ cambie de signo entre los valores dados, este método no se clasifica como un método cerrado.

Interpretación Geométrica.

$$y = x$$

$$y = G(x) = \left| x_i - \frac{f(x_i)(x_{i-1} - x_i)}{f(x_{i-1}) - f(x_i)} \right| < 1$$

Esto, para asegurar la convergencia.

Ejemplo de aplicación.

Determinar una raíz de la función $f(x) = e^{-x} - x$, para una tolerancia ≤ 0.0005 .

Tomando dos valores iniciales entre 0 y 1:

$$x_{-1} = 0$$

$$x_0 = 1$$

$$x_1 = 1 - \frac{(-0.6319)(0-1)}{1-0.6319} = 0.612783$$

$$e_a = |x_1 - x_0| = 0.38722 > tol$$

$$x_2 = 0.612783 - \frac{(-0.07094)(1 - 0.612783)}{0.63212 - 0.07094} = 0.56383$$

$$e_a = |x_2 - x_1| = 0.04895 > tol$$

$$x_3 = 0.56383 - \frac{(0.005196)(0.612783 - 0.56383)}{-0.07094 - 0.005196} = 0.567171$$

$$e_a = |x_3 - x_2| = 0.003341 > tol$$

$$x_4 = 0.567171 - \frac{(-0.0000434)(0.56383 - 0.567171)}{0.005196 - (-0.0000434)} = 0.5671433$$

$$e_a = |x_4 - x_3| = 0.0000277 < tol$$

$$e_r = \left| \frac{e_a}{x_4} \right| = 0.0000488 < tol$$

Anexo 2. Ejemplos de Aplicación de Métodos Numéricos.

A continuación se presenta la programación del Método del Punto Fijo y el Método de la Secante. El programa está escrito en PHP.

Estructura del Programa

```
<?
# Para guardar los resultados en un archivo
$arch = fopen ("prueba.doc", "w");
fputs ($arch, "Resultados de los métodos numéricos para encontrar Pso \n");

# Definición de variables
$Pi = 500; // Presión interior
$Pa = 146; // Presión atmosférica
$ya = 1.3; // cociente del calor específico atmosférico
$yi = 1.4; // cociente del calor específico de la sustancia contenida en el tanque
$Ti = 560; // Temperatura interna
$Ta = 100; // Temperatura ambiental

// Guarda las variables
fputs ($arch, "Datos: \n");
fputs ($arch, "Pi = $Pi \nPa = $Pa \nya = $ya \nyi = $yi \nTi = $Ti \nTa = $Ta \n \n \n");

// Método del Punto Fijo
$Pso[0] = .5; # Valor inicial de la presión
$es = (0.5 * pow(10,-3)); # Criterio de error con 5 cifras significativas
$num_iter = 10000; # Número de iteraciones máximo
fputs ($arch, "Método del punto fijo \n \n");
fputs ($arch, "Criterio de error = $es \n");
echo "<p>";

$i = 0; # Inicio del contador de iteraciones
```

```

do{
    $Pso[$i+1] = ($Pi/ $Pa) - pow(1-((( $yi-
1)*$Pso[$i])/(2*sqrt($Ti/$Ta)*sqrt(pow($ya,2)+(0.5*$ya*($ya+1)*$Pso[$i]))),((2*$yi)/(1-$yi))) - 1;
    $i = $i + 1; # Aumenta contador
    if ($Pso[$i] != 0){
        $ea = abs(($Pso[$i]-$Pso[$i-1])/$Pso[$i])*100; # Error absoluto en porcentaje
    }
    if ($i >= $num_iter)
        break; # Rompe el ciclo si se pasa del número de iteraciones propuesto

    echo " Pso $i= $Pso[$i] *** ea = $ea ";
    fputs ($arch, " Pso $i= $Pso[$i] *** ea = $ea \n");
    echo "<p>";
} while ($ea > $es); # El ciclo se mantiene mientras que el error absoluto sea más grande que el
criterio de error
fputs ($arch, "\nValor encontrado para Pso$i = $Pso[$i] \n \n \n");

// Método de la secante
echo " <b> Método de la secante </b>";
fputs ($arch, "Método de la secante \n \n");
echo "<p>";
echo "<p>";

# Se deben proporcionar dos valores iniciales: x-1 y x0.
$Pso[0] = -1; # Valor anterior a X0
$Pso[1] = 0;
$tol = .00001;
fputs ($arch, "Tolerancia = $tol \n");
# evaluando la función para los valores iniciales
$f[0] = ($Pi/ $Pa) - pow(1-((( $yi-
1)*$Pso[0])/(2*sqrt($Ti/$Ta)*sqrt(pow($ya,2)+(0.5*$ya*($ya+1)*$Pso[0]))),((2*$yi)/(1-$yi))) - 1 -
$Pso[0];
$f[1] = ($Pi/ $Pa) - pow(1-((( $yi-1)*$Pso[1])

```

```

/(2*sqrt($Ti/$Ta)*sqrt(pow($ya,2)+(0.5*$ya*($ya+1)*$Pso[1]))),((2*$yi)/(1-$yi)) - 1 - $Pso[1];
$n = 1;
do {
    if ($n > 1){
        # Evaluación de la función para los valores de Pso que se vayan obteniendo
        $f[$n] = ($Pi/ $Pa) - pow(1-(((1-$yi-
1)*$Pso[$n])/(2*sqrt($Ti/$Ta)*sqrt(pow($ya,2)+(0.5*$ya*($ya+1)*$Pso[$n]))),((2*$yi)/(1-$yi)) - 1
- $Pso[$n];
    }
    # Fórmula de la secante
    $Pso[$n+1] = $Pso[$n] - (($f[$n] * ($Pso[$n-1]-$Pso[$n]))/($f[$n-1]-$f[$n]));
    $n = $n + 1;
    $ea = abs($Pso[$n] - $Pso[$n-1]); // error absoluto
    $er = abs($ea/$Pso[$n]); //error relativo
    // Imprime datos de prueba
    $nm2 = $n-2;
    $nm1 = $n-1;
    fputs ($arch, "Pso$nm2 = $Pso[$nm2] \n Pso$nm1 = $Pso[$nm1] \n Pso$n = $Pso[$n] \n
ea = $ea \n er = $er \n \n");

} while ($er > $tol); // Se mantiene el ciclo mientras el error relativo sea mayor que la tolerancia
fputs ($arch, "\nValor encontrado para Pso$n = $Pso[$n] \n \n");
?>

```

A continuación aparece el resultado de la ejecución del programa:

Resultados de los métodos numéricos para encontrar P_{so} :

Datos:

Pi = 500

Pa = 146

ya = 1.3

yi = 1.4

Ti = 560

Ta = 100

Método del punto fijo

Criterio de error = 0.0005

Pso 1= 1.2128930886041 *** ea = 58.776251204842

Pso 2= 0.94135801239809 *** ea = 28.845037980217

Pso 3= 1.0422612656919 *** ea = 9.6811861493081

Pso 4= 1.004492289728 *** ea = 3.7600065575527

Pso 5= 1.0185877944444 *** ea = 1.3838281582916

Pso 6= 1.0133216805762 *** ea = 0.51968826574921

Pso 7= 1.015288318188 *** ea = 0.19370237760483

Pso 8= 1.0145537642523 *** ea = 0.072401676639645

Pso 9= 1.0148281102479 *** ea = 0.027033740275874

Pso 10= 1.0147256435659 *** ea = 0.010097969107229

Pso 11= 1.0147639139937 *** ea = 0.0037713627075365

Pso 12= 1.0147496202749 *** ea = 0.0014085956237572

Pso 13= 1.0147549588662 *** ea = 0.00052609659405551

Pso 14= 1.0147529649437 *** ea = 0.0001964933970841

Valor encontrado para Pso14 = 1.0147529649437

Método de la secante

Tolerancia = 1E-005

Pso0 = -1

Pso1 = 0

Pso2 = 0.83484672026145

ea = 0.83484672026145

er = 1

$$Pso1 = 0$$

$$Pso2 = 0.83484672026145$$

$$Pso3 = 1.0105495769733$$

$$ea = 0.17570285671187$$

$$er = 0.17386861636033$$

$$Pso2 = 0.83484672026145$$

$$Pso3 = 1.0105495769733$$

$$Pso4 = 1.0147432591815$$

$$ea = 0.004193682208198$$

$$er = 0.0041327519747021$$

$$Pso3 = 1.0105495769733$$

$$Pso4 = 1.0147432591815$$

$$Pso5 = 1.0147535066135$$

$$ea = 1.0247431963206E-005$$

$$er = 1.0098444495555E-005$$

$$Pso4 = 1.0147432591815$$

$$Pso5 = 1.0147535066135$$

$$Pso6 = 1.0147535071488$$

$$ea = 5.3530513355327E-010$$

$$er = 5.2752232909974E-010$$

Valor encontrado para Pso6 = 1.0147535071488

Como se pudo observar, el Método de la Secante converge más rápido que el Método del Punto fijo.

Abreviaturas y siglas

- **ALOHA.** Areal Locations of Hazardous Atmospheres.
- **ARCHIE.** Automated Resource for Chemical Hazard Incident Evaluation.
- **CAMEO.** Computer-Aided Management of Emergency Operations.
- **MARPLOT.** Mapping Application for Response, Planning, and Local Operational Tasks.
- **PHP.** Acrónimo recursivo de "PHP: Hypertext Preprocessor", originado inicialmente del nombre PHP Tools, o Personal Home Page Tools. Un lenguaje de programación interpretado que se utiliza mayormente para desarrollar servicios web. PHP es un lenguaje de fácil aprendizaje, distribuido en forma gratuita, que permite interactuar con muchos sistemas de gestión de bases de datos.
- **SACIE.** Sistema de análisis de consecuencias generadas por incendios o explosiones.

Bibliografía

- Baker. W. E. Et al. *Explosion hazards and Evaluation*. p 106, 205–206. Elsevier Scientific Publishing Company. Estados Unidos de América. 1980.
- Chapra S.C y Canale R.P. *Métodos numéricos para ingenieros*. Cuarta edición. p 141–157. Mc-Graw Hill, México D.F. 2004.
- Documentación de ARCHIE
<http://hazmat.dot.gov>
- Documentación de ALOHA
<http://www.epa.gov/ceppo/cameo/aloha.htm>
- Documentación de CAMEO
<http://www.epa.gov/ceppo/cameo/cameo.htm>
- Documentación de SUPERCHEMS™
http://www.iomosaic.com/iomosaic/products/software/superchems_diers/superchems_facts/superchems_facts.pdf
- Fichas Internacionales de Seguridad Química (FISQ)
<http://www.mtas.es/insht/ipcsnspn/Introducci.htm>
- Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT
<http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetas/422/universo.html>

- Librería FusionCharts para gráficas
<http://www.fusioncharts.com/>
- Librería FPDF para generar documentos pdf
<http://www.fpdf.org/>
- Masters G.M. Introduction to environmental engineering and science. Second edition. p 412- 413. Prentice Hall, New Jersey. 1998.
- USEPA. 2001. An overview of Risk Assessment and RCRA. EPA530-F-00-032: Washington D.C.