

UNIVERSIDAD DE LAS CIENCIAS INFORMÁTICAS
FACULTAD 5
ENTORNOS VIRTUALES



**PROPUESTA DE ALGORITMO PARA LA SIMULACIÓN DE LAS EXPLOSIONES AÉREAS PARA
LOS SIMULADORES DE TIRO**

Trabajo de Diploma para optar por el título de
Ingeniero en Ciencias Informáticas

Autores: Yanet Pacheco Montero
Arlis Rachel Díaz Domínguez

Tutores: Lic. Zenaida Margarita Cano Fuentes
TCor Dr. C Julio Ernesto Lanza Rodríguez

Consultante: Ing. Oliver Fernández Gill

Ciudad de la Habana, Junio de 2007
“Año 49 de la Revolución”

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Por este medio declaramos que somos los únicos autores de este trabajo y autorizamos a la Universidad de las Ciencias Informáticas para que haga el uso que estime pertinente con el mismo en su beneficio.

Para que así conste firmo la presente a los ____ días del mes de _____ del año 2007.

Firma del Autor
(Yanet Pacheco Montero)

Firma del Autor
(Arlis Rachel Díaz Domínguez)

Tutor
(Lic. Zenaida Margarita Cano Fuentes)

Tutor
(TCor Dr. C Julio Ernesto Lanza Rodríguez)

AGRADECIMIENTOS

A los dos sentimientos sublimes que lo hicieron posible: el Amor y la Amistad.

A mis padres por su inspiración en todos mis proyectos, por su confianza y por el amor depositado en mí.

A mi hermano.

A mis tíos, mis abuelas y en general a toda mi familia por confiar en mí en los momentos difíciles.

A Eric por estar a mi lado en los buenos y malos momentos, por comprenderme y brindarme su ternura.

A mis tutores por confiar en mí y por guiarnos satisfactoriamente.

A los profesores Oliver Gill, Pedro Martinto y Raúl Espinosa por su ayuda

En especial a mi tía Elda por su cariño y su apoyo.

A mis amigos Marleodys e Ivanier y a otros que me han apoyado en este momento.

Yanet Pacheco

A mis padres, sin los cuales sería imposible mi existencia, por ser mi sostén en todo momento, su confianza y dejarme actuar por mí misma.

A mi hermano.

A Reynaldo por su apoyo, amor y paciencia en cada instante.

A mi familia.

A los profesores que nos han ayudado.

A las buenas amistades.

Artis Rachel Díaz Domínguez

DEDICATORIA

A mis padres que tanto han esperado y hecho para que se haga posible este momento

A mi hermano

A mi familia que me ha apoyado en el transcurso de la carrera.

A Eric

A todos los que me han ayudado sin los cuales no hubiera llegado hasta aquí.

Yanet Pacheco Montero.

A mis padres y hermano.

A Rey.

A todos los que me han ayudado.

Arlis Rachel Díaz Domínguez

RESUMEN

En el presente trabajo se modela un algoritmo eficiente que permite simular el comportamiento físico de las explosiones aéreas para los simuladores de tiro a partir de las limitantes que presenta un algoritmo tomado como punto de partida.

Para el desarrollo de la investigación se realizó un estudio de las temáticas a tratar mediante consultas a fuentes bibliográficas, análisis de los modelos matemáticos que describen la explosión aérea y su observación en el mundo real para lograr una mejor comprensión del fenómeno. Parte de la bibliografía consultada son documentos de uso restringido, solo al alcance del personal militar, razón por la cual el lector no encontrará el acceso a dicha literatura.

Como resultado se obtuvo un algoritmo eficiente con complejidad superior permitiendo una mayor cantidad de operaciones y erradicando las limitantes anteriores. Además se proponen las herramientas para la futura visualización gráfica del algoritmo.

La modelación de este algoritmo permitirá simular las explosiones aéreas con carácter real en los simuladores de tiro, incrementando su productividad y realismo virtual proporcionando una mejor formación de los soldados.

PALABRAS CLAVES

Explosión aérea, simulación, modelos matemáticos, algoritmo, eficiencia.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	4
1.1 CONCEPTOS	4
¿Que es una explosión aérea?	4
¿Qué es la simulación?	5
¿Qué es un modelo?	5
¿Qué es un algoritmo?	7
1.2 PANORAMA, TENDENCIAS Y ALGORITMOS ACTUALES	8
Simulación de explosiones aéreas	9
Algoritmos actuales	9
1.3 MOTORES DE SISTEMAS DE REALIDAD VIRTUAL	16
1.4 LIBRERÍAS GRÁFICAS, LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN Y PLATAFORMAS DE DESARROLLO	17
Lenguaje de programación C++	18
Plataformas de desarrollo	19
CONSIDERACIONES	20
CAPÍTULO 2 ANÁLISIS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS	21
1.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS EXPLOSIONES AÉREAS	21
Sobrepresión en la explosión aérea	23
Velocidad de propagación de los gases de la explosión aérea	23
Tiempo de acción de la onda de choque aérea	23
Temperatura de la onda de choque aérea	23
2.2 CONDICIONES DE CONTORNO	24
2.3 MODELOS MATEMÁTICOS	24
Modelo de la explosión aérea	25
Modelos para el cálculo de la sobrepresión	27
Modelo para el cálculo del tiempo de acción	32
Modelo para el cálculo de la velocidad	33
Modelo para el cálculo de la temperatura	33

CONSIDERACIONES	34
CAPÍTULO 3 PROPUESTA DEL ALGORITMO	35
3.1 PROPUESTA DE ALGORITMO SIMULACIÓN DE LAS EXPLOSIONES AÉREAS	35
Algoritmo: Simulación de las explosiones aéreas	36
3.2 PSEUDOCÓDIGO DEL ALGORITMO: SIMULACIÓN DE LAS EXPLOSIONES AÉREAS	40
3.3 EFICIENCIA DEL ALGORITMO: SIMULACIÓN DE LAS EXPLOSIONES AÉREAS	50
3.4 APORTES DEL ALGORITMO	54
3.5 HERRAMIENTAS PARA LA VISUALIZACIÓN GRÁFICA DEL ALGORITMO	54
CONSIDERACIONES	56
CONCLUSIONES	57
RECOMENDACIONES	58
BIBLIOGRAFÍA	59
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	60
ANEXOS	61
Anexo 1. Algoritmo: Simulación del comportamiento de las explosiones aéreas. Bloque3.	61
Anexo 2 Algoritmo: Simulación de explosiones aéreas. Funciones auxiliares	62
GLOSARIO	66

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el constante cambio en el mundo tecnológico y la creciente necesidad de nuevas y excelentes tecnologías que nacen aleatoriamente, ocasionan que los usuarios algunas veces se mantengan al margen de las nuevas herramientas que surgen para compensar demandas de visualización e interacción de modelos que manipulan grandes cantidades de información.

El desarrollo de computadoras con alta capacidad de graficación ha permitido la incorporación de nuevas tecnologías de visualización y modelación como lo es la Realidad Virtual, posibilitando una excelente comprensión de los fenómenos mediante su simulación de forma tridimensional e interactiva.

La simulación se ha convertido en una técnica eficaz que permite reproducir los objetos reales cuando por problemas de tiempo, recursos o seguridad no es posible realizar la actividad en su medio natural con sus auténticos elementos. Constituye un recurso importante para visualizar y modelar sistemas naturales en determinadas áreas, ofreciendo grandiosos beneficios como por ejemplo en la industria del entretenimiento (videojuegos), automotriz (simulador de carro), en la medicina (realización de prótesis, intervención médica a niveles celulares, ingeniería genética), en la meteorología (estudio de tormentas eléctricas), paseos virtuales o en lo referido a la industria militar.

Al mismo tiempo, esta técnica ha dado paso al surgimiento de los simuladores virtuales: sistemas orientados principalmente al desarrollo de habilidades en la maniobra de equipos mediante una ambientación digital que logra una buena aproximación a la realidad con un ahorro de recursos y entrenamiento. Los simuladores virtuales tienen una fuerte demanda en el ámbito militar porque permiten a los soldados encontrarse en un campo de combate común, virtual, interactivo y realista.

En Cuba una de las empresas que ha promovido el desarrollo de los simuladores es el “Centro de Investigación y Desarrollo #2” (CID2) conocido en el mercado como SIMPRO (Simuladores Profesionales).

La Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI), proyecto nacido al calor de la Batalla de Ideas, con el propósito de formar profesionales y como soporte para la informatización del país se ha dedicado a la simulación de prácticas reales en ambientes virtuales. La facultad 5, conocida en esta institución como “Entornos Virtuales”, se encuentra inmersa en los proyectos de simuladores con el propósito de elaborar productos a la medida con tecnologías de Realidad Virtual tanto para el aprendizaje y entrenamiento

profesional como para el entretenimiento, donde se garantice un aporte social y económico para nuestro país.

Esta facultad y SIMPRO están desarrollando simuladores de tiro con el propósito de entrenar a los soldados de forma eficiente ahorrando al país cuantiosos gastos en recursos. Estos sistemas, en un principio estaban basados en tablas de tiro adosadas al armamento, limitando la inclusión de nuevos modelos que describen el fenómeno que se desea simular; particularmente las explosiones aéreas, fenómeno inherente en el arte de la guerra.

Las simulaciones de explosiones aéreas que se han realizado hasta hace un tiempo, carecían de algoritmos que simularan el comportamiento físico a partir del uso de modelos matemáticos que logran una aproximación al fenómeno real.

Con el progreso de las técnicas computacionales y la necesidad de crear ambientes simulados con explosiones aéreas se desarrolló un algoritmo que permite describir el comportamiento físico de este fenómeno.

Este algoritmo no es lo suficientemente eficiente, pues aunque posee todas las condiciones para poder ser adaptado a la simulación de explosiones aéreas que se requiere para los simuladores de tiro, presentan limitantes, por ejemplo, determina un solo parámetro impidiendo observar la relación que existe entre los parámetros que caracterizan la explosión; no posibilita investigar los efectos de la explosión para las distancias que el usuario desea; no permite comparar, investigar y analizar los resultados obtenidos al implicar el empleo de un solo modelo y no posee almacenamiento de datos. Producto de estas limitantes no se alcanza maximizar la eficiencia que se desea al emplear los recursos informáticos disponibles por lo que implica una afectación a la simulación que se desea realizar y con ello al rendimiento de los simuladores de tiro.

Considerando la problemática existente, es necesario modelar un algoritmo eficiente que permita simular el comportamiento físico de las explosiones aéreas para los simuladores de prácticas de tiro.

Se propone como problema científico. ¿Cómo simular el comportamiento físico de las explosiones aéreas para los simuladores de tiro?

El algoritmo a modelar debe estar caracterizado por su eficiencia, erradicando los problemas del algoritmo actual y con el empleo de la menor cantidad de recursos disponibles, proporcionando una rápida ejecución de sus operaciones y una mayor eficiencia de los simuladores de tiro.

Se plantea como objeto de estudio el comportamiento físico de las explosiones aéreas y el campo de acción el algoritmo del comportamiento físico de las explosiones aéreas para los simuladores de tiro.

Este trabajo investigativo propone como objetivo general modelar un algoritmo eficiente que permita simular el comportamiento físico de las explosiones aéreas para los simuladores de tiro.

De acuerdo con esta propuesta se trazaron los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar los modelos matemáticos que describen el comportamiento físico de las explosiones aéreas en las diferentes condiciones en que se manifiesta.
2. Modelar un algoritmo eficiente para la simulación de las explosiones aéreas.

Para cumplir con los objetivos propuestos y resolver la situación problemática, se tienen las siguientes tareas:

1. Realizar un análisis exhaustivo de la literatura sobre los simuladores de tiro y los algoritmos actuales que permiten simular las explosiones aéreas.
2. Efectuar un análisis de las limitantes presentadas en el algoritmo empleado en la simulación de las explosiones aéreas.
3. Realizar un estudio de los lenguajes de programación, librerías gráficas y plataformas que se pueden proponer para la visualización del algoritmo
4. Estudiar el comportamiento físico de las explosiones aéreas.
5. Identificar los modelos matemáticos que describen el comportamiento físico de las explosiones aéreas en diferentes condiciones.
6. Realizar la modelación del algoritmo que simule las explosiones aéreas.
7. Proponer las herramientas para la futura visualización gráfica del algoritmo modelado.

La presente propuesta está antecedida por el algoritmo que se desarrolló en el ámbito militar. Se pretende finalmente modelar un algoritmo eficiente que permita simular las explosiones aéreas con carácter real contribuyendo al desarrollo de los simuladores de tiro.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En este capítulo se abordan diferentes conceptos que resultan necesarios para la comprensión del trabajo. Se tratan las temáticas: simuladores de tiro, simulación de explosiones aéreas y algoritmos empleados actualmente. También se analizan los lenguajes de programación, librerías gráficas y plataformas para la futura visualización gráfica del algoritmo que se modela.

1.1 CONCEPTOS

¿Que es una explosión aérea?

Según fuentes bibliográficas de diferentes autores, la *explosión aérea* se define de distintas maneras.

1. Cambio físico o químico en el estado de una masa con importante liberación de energía. (Heinrich, 1979)
2. Emisión de energía en un lapso suficientemente pequeño de tiempo, en un volumen suficientemente reducido, que genera una onda de presión finita y viaja alejándose de su origen. (Baker,1983)

A partir de las definiciones anteriores se puede concluir que una explosión aérea es el proceso de rápida transformación física o química de una sustancia que viene acompañado del paso de su energía potencial en trabajo mecánico.

Uno de los aspectos fundamentales de la explosión aérea es el brusco salto de la presión. Esta sobrepresión ΔP es la causa directa del efecto destructivo de la explosión aérea, el que está condicionado por la rápida expansión de los gases.

El proceso de la explosión en el aire posee una alta velocidad que la diferencia de las reacciones químicas convencionales.

Las explosiones aéreas influyen significativamente en la realización de las prácticas de tiro, considerándose necesario analizar el comportamiento físico en las diferentes condiciones en que se

produce con el propósito de lograr una comprensión que permita reproducir la manifestación en los simuladores de tiro mediante la simulación.

¿Qué es la simulación?

Existen varios autores que han intentado dar una definición de lo que consideran que es la *simulación*, por sólo citar algunos ejemplos se tiene:

1. Simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital, los cuales requieren ciertos tipos de modelos lógicos y matemáticos que describen el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real en períodos extensos de tiempo real. (TAYLOR 1975)
2. La simulación es diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentalmente con este modelo, con el propósito de entender el comportamiento del sistema del mundo real o evaluar varias estrategias con los cuales pueda operar el sistema. (SHANNON 1986).

De las caracterizaciones anteriores, se puede concluir como criterio para el desarrollo de esta investigación que la simulación es el desarrollo de un modelo que se obtiene de la observación y estudio del sistema real, que implica operaciones lógicas y matemáticas con el objetivo de comprender el comportamiento del sistema.

El propósito de la simulación es descubrir el comportamiento de un sistema donde se postulan teorías para pronosticar su futuro, por lo que es preciso conocer los modelos conceptuales que describen la explosión aérea para lograr una simulación lo más real posible.

¿Qué es un modelo?

Según conceptos de varios autores se tiene:

1. Es la abstracción de un sistema real, que tiene la posibilidad de emplearse para propósitos de predicción y control del mismo. (TAYLOR 1975)

2. La descripción abstracta que incluye una formulación matemática se denomina modelo matemático del problema original, permitiendo entonces tratar el problema en términos exclusivamente matemáticos. (MURTHY 1992).
3. Un modelo es la representación de un objeto o de un fenómeno con el propósito de entender el fenómeno y hacer predicciones con respecto al comportamiento futuro. (STWART 2001)

De los conceptos expuestos se toma como criterio para este trabajo que un modelo es una representación abstracta de un objeto o situación real, con el propósito de analizar su comportamiento y desarrollar teorías para facilitar una mejor comprensión.

Los modelos se utilizan ampliamente en la ingeniería, la industria, la fabricación y la investigación científica, enfocándose generalmente a comprender mejor los problemas y prever la realidad que se investiga, permitiendo el uso de computadoras para realizar la simulación de un fenómeno.

Existen modelos matemáticos que describen el comportamiento de las explosiones aéreas, entre los que se encuentra el Modelo de Sadovski y el Modelo de Sadov, demostrados por vez primera en el año 1948 y validados experimentalmente por importantes catedráticos rusos de la Academia Superior de Guerra de la Universidad de Moscú, como M .A Sadovski y Sadov, que constataron los cálculos matemáticos empleados.

En la actualidad estos modelos y otros que describen los parámetros de las explosiones áreas han sido validados de forma experimental durante varios años por el TCor Dr.C Julio Ernesto Lanza Rodríguez, ajustando los coeficientes a las condiciones concretas de Cuba. Para la validación de los mismos se emplearon las técnicas de la fotogrametría para el cálculo de los parámetros como es el caso de los valores de presión, temperatura y radio de acción de los gases de la explosión.

El conocimiento de estos modelos matemáticos posibilitará modelar un algoritmo eficiente que permita simular a las explosiones aéreas para los simuladores de tiro, teniendo en cuenta su comportamiento físico. De acuerdo a lo mencionado es necesario conocer los fundamentos básicos de un algoritmo para su correcta modelación.

¿Qué es un algoritmo?

Según revisión de fuentes bibliográficas existen diferentes autores que han intentado dar un concepto a partir de la definición de lo que consideran *algoritmo*.

1. Secuencia finita de instrucciones, reglas o pasos que describen de forma precisa las operaciones que un ordenador debe realizar para llevar a cabo una tarea en un tiempo finito. (KNUTH 1968).
2. Es un conjunto finito de reglas que ofrecen una secuencia de operaciones para resolver un tipo de problema específico. (ADDISON-WESLAY 1973).
3. Es un procedimiento que consiste en una secuencia finita de instrucciones, que permite valores de entrada y obtiene valores de salida ofreciendo solución a un determinado problema. (KOZEN 1992)

A partir de las definiciones anteriores se tiene como criterio para el desarrollo de esta investigación que un algoritmo es un conjunto de pasos ordenados finitos que resuelven un problema específico.

Los algoritmos poseen determinadas características que se consideran importantes cuando se realiza un estudio sobre ellos.

- Finitud: Un algoritmo debe de terminar al cabo de un número finito de pasos u operaciones.
- Definición: Cada paso del algoritmo debe de estar definido con precisión; las acciones que se han de efectuar deben de estar especificadas rigurosamente y sin ambigüedades.
- Entrada: Un algoritmo puede tener cero o más entradas, o sea, valores que son suministrados inicialmente cuando el algoritmo comienza.
- Salida: Un algoritmo debe tener una o más salidas, o sea, valores que guarden cierta relación con los de entrada, y que el algoritmo suministra como resultado.
- Efectividad: Cada una de las operaciones que se debe efectuar tiene que ser lo suficientemente básicas como para que puedan ser realizadas de forma exacta y en una cantidad finita de tiempo.

La calidad y el estilo son factores que influyen significativamente en la modelación de un algoritmo.

- Corrección: el algoritmo debe funcionar correctamente.
- Eficiencia: Se mide por los recursos que este consume, en particular, la memoria y tiempo de ejecución.

- Claridad: el algoritmo debe estar bien documentado. Ayuda a comprender el funcionamiento del mismo.

Los algoritmos se representan mediante lenguajes conformados por símbolos y reglas que se utilizan para describir de manera explícita un proceso.

- Diagrama de flujo: se utilizan para indicar cómo es el flujo de ejecución de las acciones que debe realizar el programa, más allá del lenguaje de programación que se emplea.
- Pseudocódigo: representa la forma descriptiva de las operaciones que debe realizar el algoritmo.

El algoritmo a modelar es claro, fiable y fácil de mantener. Permite simular los parámetros de una explosión aérea de forma eficaz, consume menos recursos y logra una solución rápida y certera.

1.2 PANORAMA, TENDENCIAS Y ALGORITMOS ACTUALES

El avance vertiginoso de la tecnología es sin duda una de las características más importantes de este siglo. Con el desarrollo de las técnicas de la Realidad Virtual y el auge que ha alcanzado la industria militar en nuestros días los simuladores de tiro constituyen una fuerte demanda en el ámbito militar, no solo porque es considerado un fundamento eficaz para el ahorro de los gastos requeridos para las prácticas militares reales sino porque optimizan los recursos operacionales disponibles con la consecuente obtención de un alto grado de capacitación del personal; resuelven en gran medida la disponibilidad cada vez menor de campos para la realización de las prácticas de tiro y ayudan a la preservación del medio ambiente, reduciendo las ejercitaciones en el terreno y con ello los daños que estos provocan en la naturaleza.

Un simulador de tiro es un sistema que intenta simular la experiencia de manipular un armamento en determinada situación cuyo costo de operación es elevado.

Los simuladores de tiro tienen su comienzo en el Departamento de Defensa de los Estados Unidos alrededor de los años sesenta a través los programas de investigación en el campo de la simulación virtual destinados al desarrollo de aplicaciones de carácter militar, ofreciendo sus primeros resultados a finales de la década de los setenta y principios de los ochenta e incrementándose con el desarrollo de la Realidad Virtual en los comienzos de los años noventa.

En los últimos años, diferentes países son considerados élites en el desarrollo de simuladores de tiro como son Estados Unidos, Rusia, Israel, Reino Unido, Alemania Argentina, Chile, entre otros.

Los simuladores de prácticas de tiro surgen en Cuba a finales de los años ochenta e incrementaron su productividad a partir de los años noventa. En la actualidad emplean las ventajas de la Realidad Virtual y las técnicas computacionales logrando una mejora de los productos en sus respectivas versiones.

Simulación de explosiones aéreas

El realismo virtual de los simuladores de tiro está dado por escenas virtuales compuestas por objetos físicos que componen un escenario entre los que se encuentran las explosiones aéreas.

La explosión aérea es un fenómeno físico característico del terreno militar. Se manifiesta al utilizar una gama de armamentos: granadas, armas de combate, cañones. Por la importancia que tiene se ha recurrido a su simulación con el propósito de analizar su comportamiento, proporcionando el ahorro de armamentos, evitando las pérdidas humanas al realizar las prácticas con explosivos y la destrucción que estas ocasionan al medio ambiente.

La simulación de explosiones aéreas es empleada en la seguridad de las empresas que utilizan sustancias explosivas, resultando de interés la herramienta Fluidyn Ventex para la simulación de explosiones confinadas y semiconfinadas, empleándose en países avanzados del primer mundo como es el caso de Reino Unido, Francia, India y Estados Unidos.

Algoritmos actuales

La simulación de explosiones aéreas requiere de algoritmos que permitan simular su comportamiento físico para los simuladores de tiro. Actualmente, el acceso electrónico a estos procedimientos se encuentra restringido a personas ajenas a las entidades que los utilizan debido a la importancia que tienen en el ámbito militar.

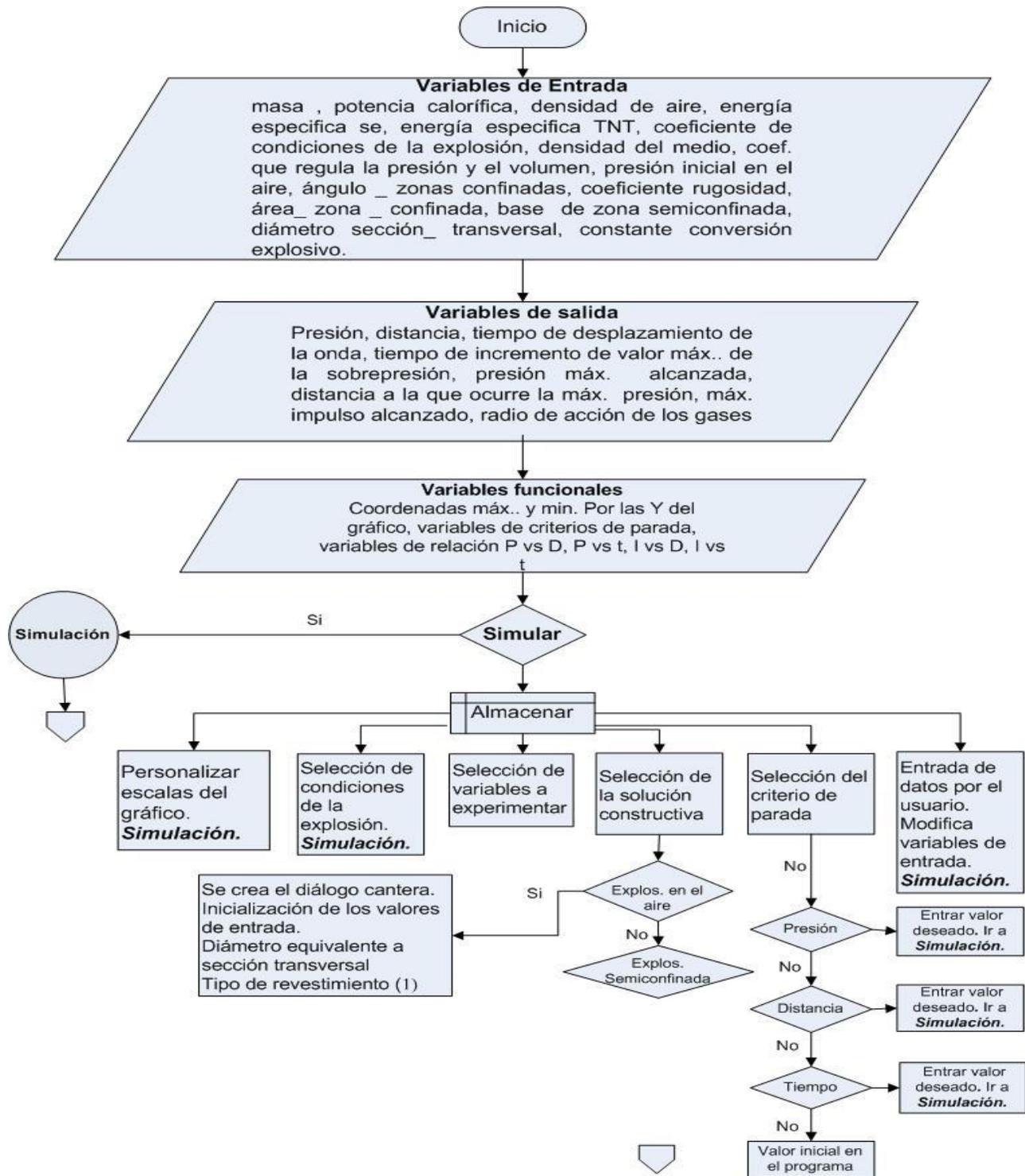
Para la modelación del algoritmo que se realiza en este trabajo se toma como punto de partida el algoritmo: Simulación del comportamiento de explosiones aéreas, creado e implementado por la Fuerzas

Armadas Revolucionarias (FAR) para analizar el comportamiento físico de las explosiones y que emplea modelos matemáticos ajustados a las condiciones en que se manifiestan. Este algoritmo recrea las condiciones (no confinadas, semiconfinadas y confinadas) que se requieren para simular las explosiones aéreas para los simuladores de tiro. Se aplica en diversas esferas de desarrollo entre las que se encuentran la minería a cielo abierto, fundición de metales y predicción de efectos destructivos.

El algoritmo presenta una estructura dividida en tres bloques:

1. Representa la forma visual para que el usuario seleccione la acción que desea realizar.
2. Representa el comportamiento de la explosión de acuerdo a las condiciones en que se producen.
3. Contiene las funciones auxiliares que describen la explosión en las diferentes condiciones de contorno. (Anexo 1)

A continuación se realiza un análisis mediante su descripción en diagrama de flujo y sus limitantes.



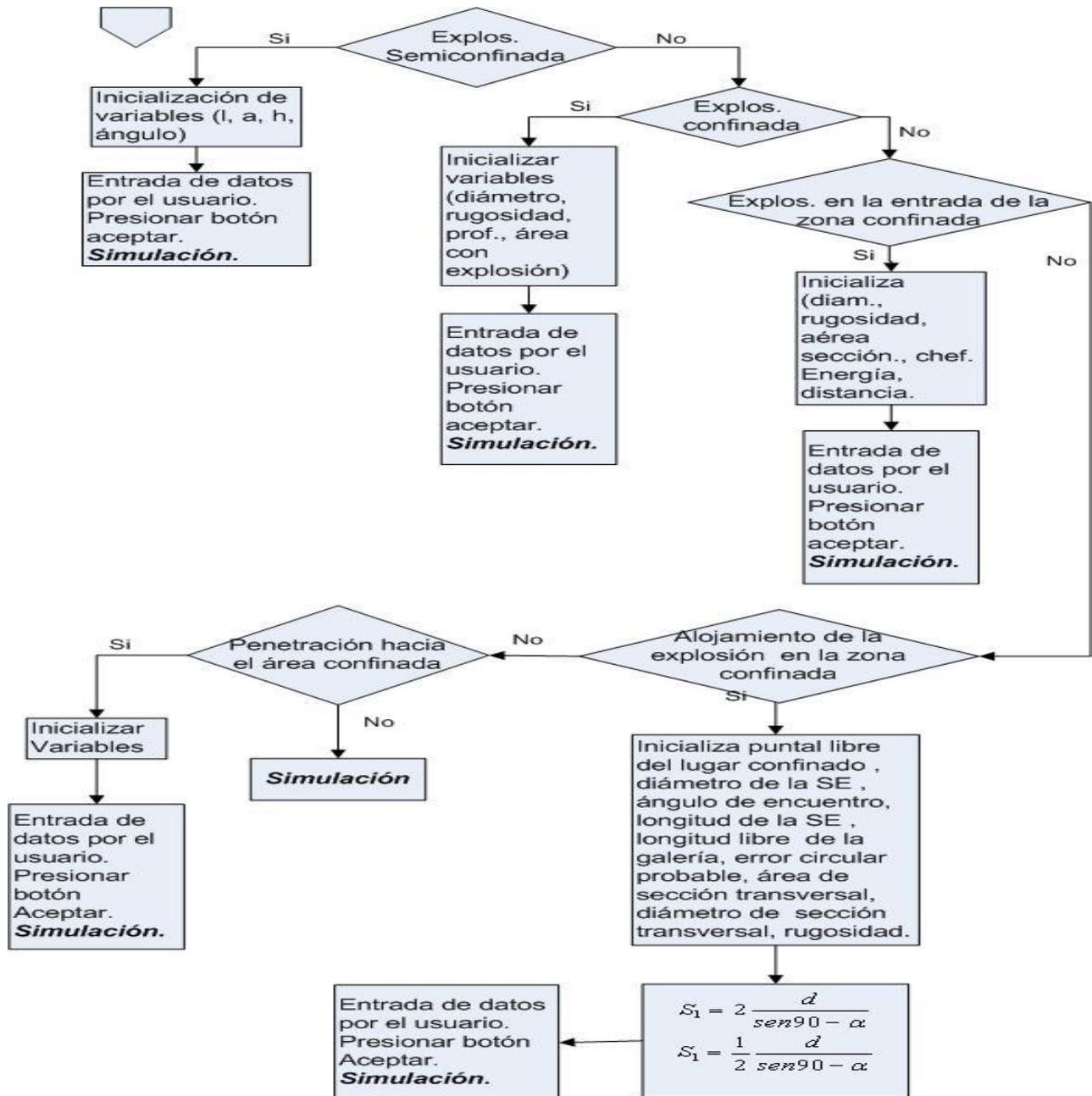
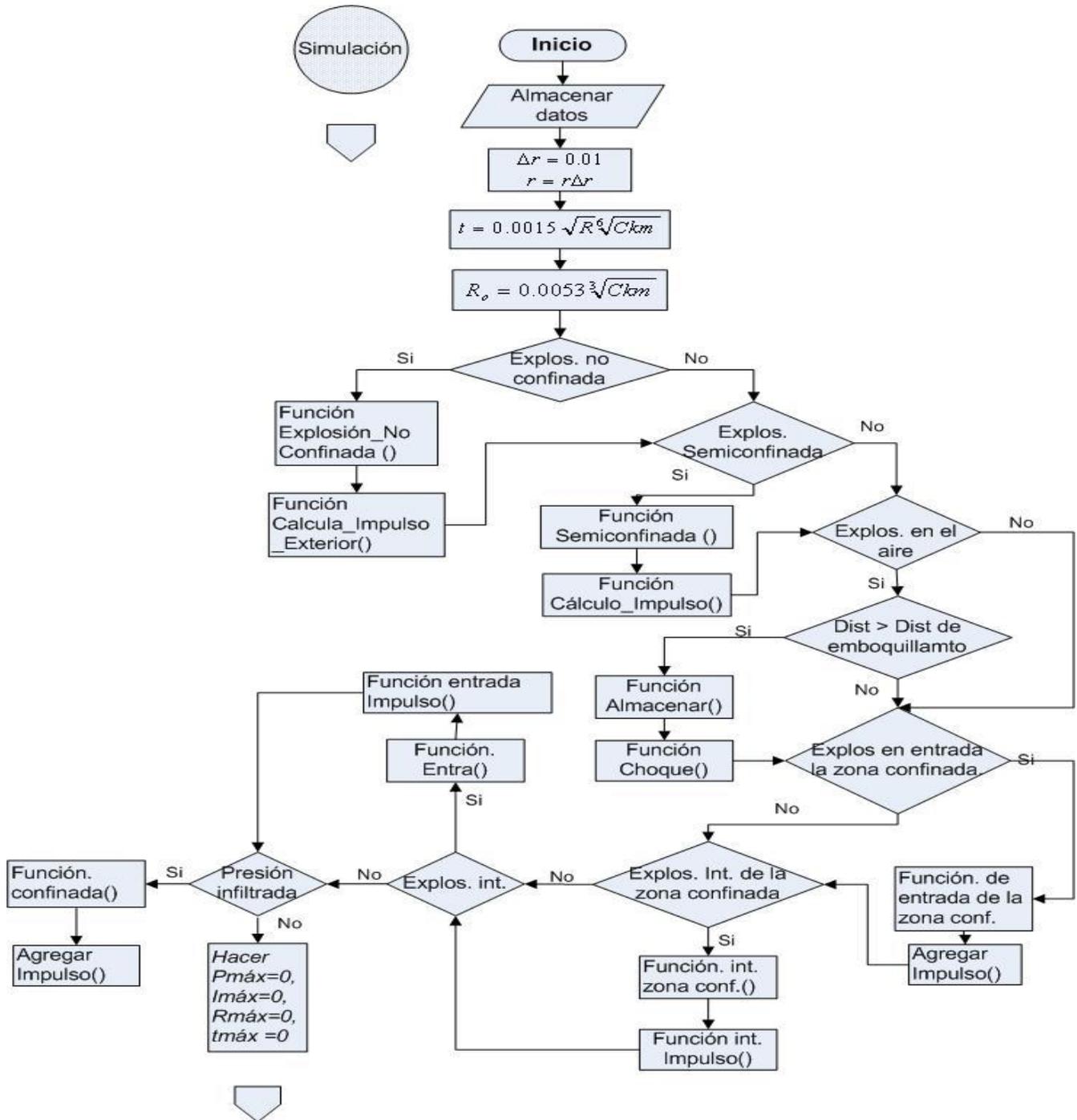


Figura 1.1. Algoritmo Comportamiento de las explosiones aéreas. Bloque 1



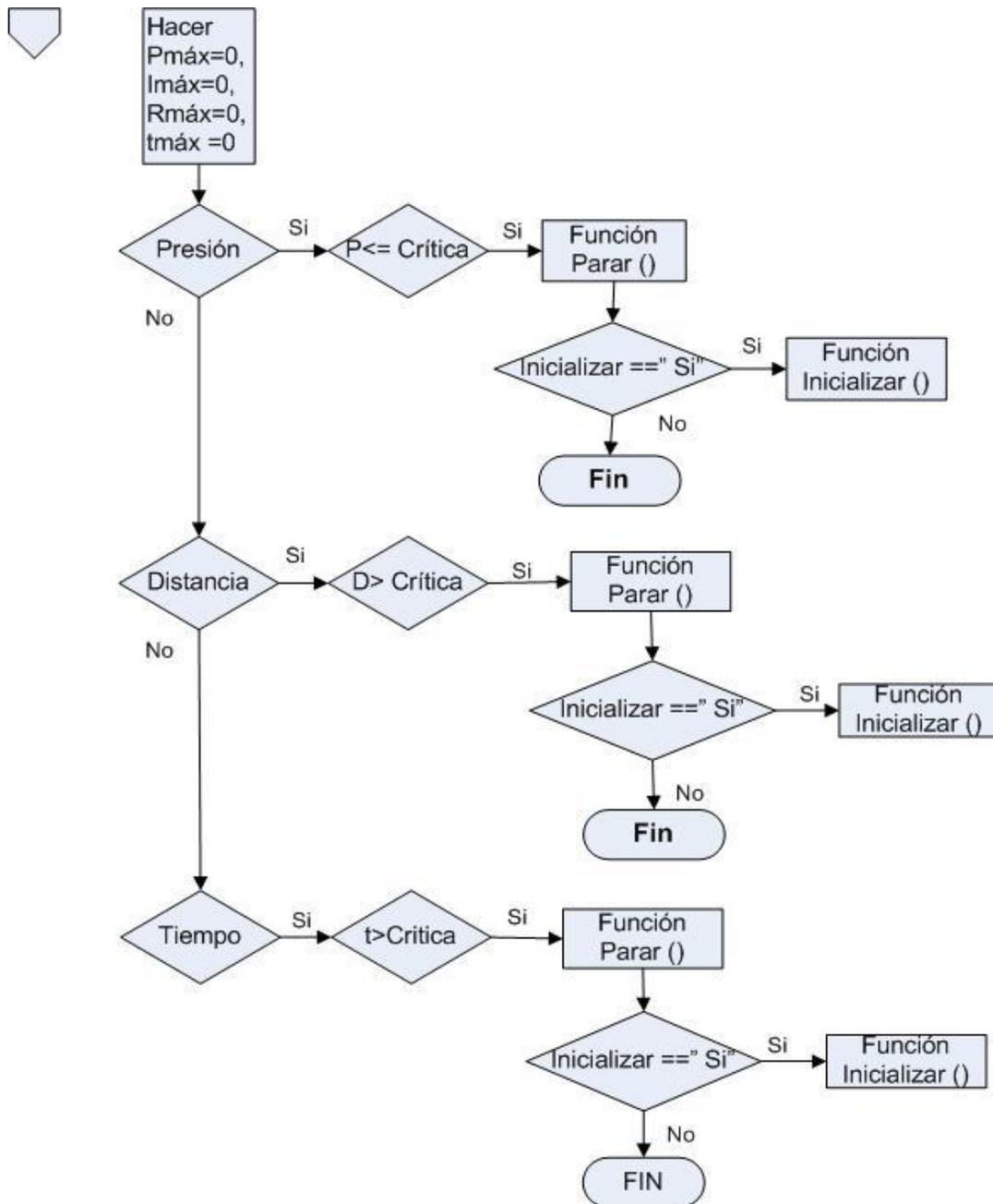


Figura 1.2. Algoritmo Comportamiento de las explosiones aéreas. Bloque 2

Se inicia mediante la declaración de variables de entrada, las variables de salida y las variables funcionales.

En el bloque 1 se declaran los elementos necesarios para la representación visual del fenómeno inicializando las escalas del gráfico con los parámetros a observar y los valores máximos y mínimos que alcanzarán de acuerdo al experimento. Se seleccionan las condiciones de la explosión (si será aire o tierra), la solución constructiva (tipo de explosión: no confinada, semiconfinada o confinada), el criterio de parada para detener la simulación y los nuevos datos de entrada para cada nueva iteración.

Cuando se determina la solución constructiva, se pregunta si la explosión es en zona no confinada, en caso que lo sea se solicitan las variables de entrada para el cálculo de los parámetros de la misma y se remite al bloque 2, de no cumplirse esta condición se plantea la posibilidad de que sea una explosión semiconfinada, si se cumple la condición se procede de igual manera que la anterior; si no es una explosión en una zona semiconfinada se plantea finalmente que es una explosión en zona confinada y se comprueba en que lugar sucede el fenómeno, solicitando los datos necesarios para el cálculo de los parámetros y se dirige al bloque 2. Luego se solicita el criterio de parada para detener el proceso de simulación, si es por tiempo, presión o distancia. La solicitud de los nuevos datos de entrada se hace cuando se recorrió por primera vez el procedimiento y al terminar comienza el recorrido inicializando los nuevos valores.

El bloque 2 contiene el trabajo relacionado con los modelos matemáticos, haciendo uso de estos mediante llamadas y la solución constructiva seleccionada previamente en el bloque 1, tomando en consideración el criterio de parada elegido. En este bloque se invocan múltiples funciones que son definidas e implementadas en el bloque 3, las cuales representan los modelos matemáticos que se emplean para cada solución constructiva.

Limitantes del algoritmo: Simulación del comportamiento de explosiones aéreas

Este algoritmo presenta limitantes que influyen en el éxito de la simulación de explosiones aéreas, por lo que es necesaria la modelación de un nuevo algoritmo que erradique los problemas detectados y permita simular el comportamiento del fenómeno satisfactoriamente. A continuación se exponen las faltas:

- No determina los parámetros físicos temperatura y velocidad de propagación que presentan las explosiones aéreas.
- No emplea los modelos de Sadov y Stakinovich los cuales describen el comportamiento físico de las explosiones aéreas no confinadas.
- El modelo que se emplea es el Modelo de Sadovski adaptado a las condiciones de contorno de explosiones semiconfinadas y confinadas.
- La simulación del fenómeno es realizada en un plano bidimensional.
- El algoritmo verifica si desea realizar la simulación y en caso que sea verdadera la condición de contorno recorre la función Simulación verificando la condicional que desea simular, si este estado es válido entonces realiza las operaciones correspondiente y recorre el procedimiento innecesariamente hasta la condición de parada, en cualquier otro caso realiza el mismo procedimiento. Esta situación genera un consumo de pasos y esfuerzo humano excesivo.
- No permite entrar la distancia a la que se desea simular los parámetros físicos de la explosión, realizando la simulación a una distancia de 10 cm.
- Las magnitudes distancia y presión pierden sus respectivos valores al no existir una estructura que almacene los datos.
- No valida la ecuación de estado de las explosiones aéreas.

1.3 MOTORES DE SISTEMAS DE REALIDAD VIRTUAL

Un Sistema de Realidad Virtual es un sistema informático que simula objetos o procesos del mundo real, basado en acciones en tiempo real, la gráfica tridimensional, la acústica y el tacto; por ejemplo los simuladores de tiro, vuelo, carro y quirúrgicos

Existen herramientas que se apoyan en librerías gráficas que permiten la visualización de los eventos que tendrán lugar en un entorno virtual a partir de algoritmos que los modelan. Pueden citarse como ejemplos el 3D-GameStudio, el WorldToolKit (WTK) y el SimpEngine.

El 3D-GameStudio es un entorno de desarrollo para la realización de juegos de ordenador muy popular con soporte para DirectX, su principal objetivo es que el creador del juego no necesita ser un programador.

WTK es un entorno de desarrollo multiplataforma avanzado, para aplicaciones gráficas 3D en tiempo real con un alto rendimiento, que posee una librería de más de 1000 funciones y herramientas programadas en C para usuarios finales, que les servirán para crear y manejar sus productos. WTK aprovecha al máximo las características disponibles de OpenGL. Fue adquirido por la empresa SIMPRO para desarrollar sus simuladores inicialmente.

El SimpEngine es un esqueleto o armazón orientado a objeto basado en OpenGL, utilizado para construir juegos. Posee diferentes clases como la *CParticleSystem* para producir varios efectos de partículas incluyendo explosiones.

En el mercado de la informática estas herramientas tienen un elevado costo por lo que para hacer uso de ellas hay que comprar las licencias y sus respectivas actualizaciones. Cuba no puede comprar este producto debido al bloqueo impuesto, razón por la cual es necesario desarrollar una herramienta propia. Atendiendo a esta limitante y la necesidad que existe de desarrollar simuladores de tiro y ahorrar recursos al país, la Facultad 5 conjuntamente con SIMPRO desarrolló un motor llamado SceneToolKit multiplataforma, que emplea la librería gráfica de OpenGL y lenguaje de programación C++.

1.4 LIBRERÍAS GRÁFICAS, LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN Y PLATAFORMAS DE DESARROLLO

Existen librerías gráficas para la visualización del proceso que se desea simular como *OpenGL* y *Directx*. OpenGL provee a los programadores de una interfaz de acceso al hardware (HW). Es poderoso, con rendering a bajo nivel y tiene una librería de software de modelamiento, disponible en la mayoría de las plataformas, con un amplio soporte de HW y emplea representación 3D gratuito y código abierto. Es diseñado para ser usado en cualquier aplicación gráfica, como juegos y simuladores.

Windows define un conjunto de funciones API Win32 que son usadas como interfaz con OpenGL.

OpenGL ofrece su propio grupo de librerías conocido como *OpenGL Utility ToolKit* (GLUT, Herramientas y Utilidades de OpenGL) con soportes disponibles en la mayoría de las plataformas y funcionalidades básicas en el área del trabajo con ventanas. GLUT mantiene la independencia de las plataformas, es decir, se puede mover fácilmente una aplicación basada en GLUT de Windows hacia Unix, con unos pocos cambios.

Directx es un intento de Microsoft de brindar un acceso “directo” al HW en el entorno del sistema operativo Windows, a través de un conjunto de APIs (interfaces para programadores de aplicaciones) que controlan un grupo de funciones que acceden al HW o lo simulan si no existe. Incluye soporte para aceleración gráfica 2D y 3D.

A continuación se presentan algunos aspectos distintivos de estas librerías

Aspectos	OpenGL	DirectX
Múltiples sistemas operativos	Sí	No
Mecanismo de extensión	Sí	Sí
Desarrollo	Múltiples Compañías	Microsoft
Actualizaciones	Anuales	Anuales

Tabla1 OpenGL vs. DirectX

Lenguaje de programación C++

C++ es un lenguaje de programación. Sus principales características son el soporte para programación orientada a objetos y el soporte de plantillas o programación genérica (templates). Se puede decir que es un lenguaje que abarca tres paradigmas de la programación: la programación estructurada, la programación genérica y la programación orientada a objetos.

C++ es la evolución de C adaptada a la programación orientada a objetos. Tiene algunas cuestiones más pulidas como un control más estricto en el manejo de tipos de datos, y otras características que ayudan a

la programación libre de errores. Posee una serie de propiedades difíciles de encontrar en otros lenguajes de alto nivel:

- Posibilidad de redefinir los operadores (sobrecarga de operadores)
- Identificación de tipos en tiempo de ejecución (*RTTI*)

C++ está considerado por muchos como el lenguaje más potente, debido a que permite trabajar tanto a alto como a bajo nivel.

Plataformas de desarrollo

Una plataforma de desarrollo es el entorno común en el cual se desenvuelve la programación de un grupo definido de aplicaciones relacionada directamente a un sistema operativo (SO), como Windows y Linux.

Windows dispone de una interfaz gráfica que facilita el manejo de los procedimientos: cada comando puede ser visualizado en pantalla mediante una imagen que lo representa. Es considerado el SO con mayor difusión en el mercado informático. Tiene facilidad de mantenimiento así como soporte en el desarrollo de nuevas aplicaciones. Es un software propietario y en esto subyacen dos puntos específicos: la empresa es “propietaria” de los códigos fuente del sistema y sólo ella es capaz de modificar al sistema operativo, el usuario sólo tiene permitida la instalación del programa en su máquina. Por otro lado la instalación se realiza gracias a una clave de acceso a los archivos que se entrega junto con la compra del sistema y de este modo se evitan las “copias piratas”.

Linux es un SO que pertenece a la corriente del copyleft, (en oposición a copyright) y que, por lo tanto, es gratuito. Se trata de un software libre donde cada usuario dispone de la licencia GPL (licencia pública general) que le permite el ingreso al código fuente del SO y así cualquier programador será capaz de modificar y mejorar cualquier parte del sistema. Cada licencia, sin embargo, es personal, ya que Linux posee un esquema de seguridad basado en un sistema de permisos de lectura, escritura y ejecución establecidos a los archivos y directorios: el usuario puede modificar únicamente sus propios archivos a menos que el dueño le haya dado los permisos correspondientes. Esta última característica explica la menor cantidad de virus que transitan en este sistema y su menor peligrosidad.

Para la selección de la plataforma, es necesario respetar los entornos y las aplicaciones correspondientes para obtener un buen rendimiento y un mejor resultado. Cada sistema tiene fuertes características que los diferencian. Windows se apoya en su exclusiva popularidad, y Linux apuesta a los cambios profundos para combatirlo

CONSIDERACIONES

En el transcurso de este capítulo se consultaron las fuentes bibliográficas de los conceptos a emplear en el desarrollo de esta investigación y se mostraron las principales limitantes del algoritmo tomado como punto de partida. Se expusieron las características fundamentales de las librerías gráficas OpenGL y DirectX, del lenguaje de programación C++ y las posibles plataformas. Debido a la complejidad del comportamiento físico de las explosiones aéreas surge la necesidad de estudiar los modelos matemáticos para conformar el modelo conceptual del fenómeno que se va a algoritmizar

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

Diversos autores hablan sobre el fenómeno de la explosión. Es un proceso que de forma sistemática expresa un conjunto de leyes que se cumplen de acuerdo al medio donde se producen. Para llegar a una correcta modelación y simulación computacional de las explosiones aéreas es necesario conocer su comportamiento físico y sus particularidades.

En el presente capítulo se proponen modelos matemáticos que describen el comportamiento que manifiesta una explosión aérea en las diferentes condiciones de contorno y se efectúa un análisis de sus parámetros físicos.

1.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS EXPLOSIONES AÉREAS

Cuando se analiza un fenómeno físico es requisito imprescindible caracterizarlo. En la explosión aérea ocurre la detonación, creando una onda de choque que se propaga como resultado de la transferencia de la energía que originan los gases de la explosión.

Los gases de la explosión aérea al ser limitados por el aire comprimen a este, comunicándole cierta velocidad por la dirección de los radios que tienen su origen en el centro de la explosión. Al expandirse, la masa de los gases desplaza al aire que la rodea formando a su alrededor una zona de aire condensado y caliente.

De esta forma quedan claramente definidas dos zonas de análisis

1- La zona *I*: Distancias que satisfacen:

$$R_c \leq (11 \sim 15) R_o$$

2- La zona *II*: Distancias que satisfacen:

$$R_c > (11 \sim 15) R_o$$

El valor $15R_0$ se tiene en consideración para un posterior análisis como un valor de comparación, debido a que en el tramo $(11 \sim 15) R_0$ los expertos no han logrado explicar que ocurre con los parámetros que describen la explosión aérea.

Es válido aclarar que generalmente se le realiza el análisis a la zona *II* donde los parámetros alcanzan sus valores máximos. En esta zona se produce una onda de choque aérea la cual se propaga en todas las direcciones a partir del lugar de la explosión permitiendo interpretar los parámetros destructivos, siendo de interés al realizar la simulación de las explosiones aéreas. Entre estos parámetros se encuentran:

- Presión en el frente de la onda de choque
- Temperatura
- Tiempo de acción
- Velocidad de propagación de frente de la onda de choque.

Estas magnitudes físicas incluyen variables independientes que se tienen en cuenta para expresar los modelos matemáticos, delimitando el comportamiento de los parámetros destructivos. Por esta razón, para la formulación de los modelos las relaciones entre variables dependientes e independientes serán diferentes.

Las variables independientes a partir del comportamiento del fenómeno en las zonas cercanas de la explosión $(11 \sim 15 R_0)$, son las siguientes:

- Masa de sustancia explosiva [SE] (Kg).
- Radio de la carga esférica reducida a la forma esférica R_0 (m).
- Radio de acción de los gases de explosión R_c (m).

Para distancias superiores a $(11 \sim 15R_0)$ las variables independientes se definen como:

- Masa de SE (Kg).
- Distancia desde el centro de la explosión hasta el lugar de interés (R).

Sobrepresión en la explosión aérea

Una característica fundamental de la onda de choque aérea es la sobrepresión, la cual es un salto de presión que tiene lugar de forma instantánea al acercarse la onda al lugar de registro de la presión.

Un aspecto significativo en este hecho es la velocidad de propagación de los gases de la explosión.

Velocidad de propagación de los gases de la explosión aérea

Al ocurrir una explosión aérea los gases que expide alcanzan velocidades muy similares a la velocidad del sonido. La Teoría de Termodinámica de los Gases plantea que la velocidad de propagación de los gases se determina en función de las densidades del aire y la presión de la onda de choque, donde las masa de aire comprimidos que son impulsadas por las ondas desarrollan una velocidad que va a depender de la velocidad de propagación y la velocidad del sonido.

Tiempo de acción de la onda de choque aérea

El tiempo que demora la sobrepresión en recorrer la distancia a partir del momento de la explosión. Establece una dependencia con respecto a la masa de SE y a la distancia R .

Temperatura de la onda de choque aérea

La temperatura que alcanza la onda de choque toma valores superiores en comparación con la temperatura que existe en el lugar donde ocurre la explosión. Está dada en función del valor de sobrepresión del frente de onda, la presión y temperatura atmosférica.

2.2 CONDICIONES DE CONTORNO

Los espacios que tienen una barrera natural o creada artificialmente que delimita un contorno se les puede considerar, en dependencia de su situación: confinado, semiconfinado y no confinado. Las explosiones aéreas que tienen lugar en estos espacios toman su clasificación en dependencia de esta condición.

Las explosiones no confinadas ocurren al aire libre. Estas explosiones al no tener un contorno que delimite su expansión abarca un área circular en torno al origen de la misma, avanzando en todas las direcciones, atenuándose con el paso del tiempo.

Las explosiones confinadas tienen lugar en zonas abiertas superiormente y de una profundidad tal que dificulta su ventilación natural, entre las que se encuentran los pozos y los locales cerrados, mientras las explosiones semiconfinadas tienen lugar en espacios cerrados con una pequeña abertura de entrada y salida, como las paredes.

2.3 MODELOS MATEMÁTICOS

La simulación de las explosiones aéreas es una tarea compleja donde se analizan los modelos matemáticos que representan los parámetros que influyen en su comportamiento, logrando una aproximación lo más real posible del fenómeno.

Con este propósito se identifican los modelos matemáticos que se caracterizan por ser factibles, con un alto nivel de confiabilidad que satisface el comportamiento real de las explosiones aéreas. Estos modelos arrojan distintos resultados con respecto a un parámetro a causa de las variables independientes de cada uno, por esta razón se comportan diferentes ante las condiciones de contorno.

Para identificar los modelos matemáticos y lograr una mejor comprensión del fenómeno se observó una experimentación de las variables independientes y dependientes con la ayuda de equipos especializados que muestran el comportamiento del ambiente que se desea simular, posibilitando que el algoritmo que se quiere modelar responda a una realidad experimentada y comprobada en la práctica, adquiriendo un carácter científico el trabajo que se presenta.

Este experimento se realizó en el Instituto Militar Escuela Interarmas Antonio Maceo con el asesoramiento

de especialistas en explosiones aéreas y considerando las condiciones idóneas necesarias para el desarrollo del fenómeno.

Para realizar la simulación de las explosiones aéreas se aplican las siguientes inferencias con el propósito de simplificar la realidad del fenómeno y facilitar su estudio.

- Tratar la explosión aérea como unidimensional, posee el mismo comportamiento en las tres dimensiones del espacio, por lo que el trabajo realizado en un eje puede ser traspolado a los restantes.
- La explosión aérea se analiza como una esfera, por lo que posee alta simetría y variación en sus parámetros.

Se hace imprescindible el análisis de los modelos matemáticos que simulan el comportamiento de las explosiones aéreas.

Modelo de la explosión aérea

El fenómeno de la explosión es representado por el sistema de ecuaciones diferenciales de Navier-Stokes.

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} \times \frac{1}{\rho} + \frac{\partial \left(k_x \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} \right) \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(k_y \left(\frac{\partial V_y}{\partial y} \right) \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(k_z \left(\frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \right)}{\partial z}$$

$$\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} \times \frac{1}{\rho} + \frac{\partial \left(k_x \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} \right) \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(k_y \left(\frac{\partial V_y}{\partial y} \right) \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(k_z \left(\frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \right)}{\partial z}$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} \times \frac{1}{\rho} + \frac{\partial \left(k_x \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} \right) \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(k_y \left(\frac{\partial V_y}{\partial y} \right) \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(k_z \left(\frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \right)}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + V_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + V_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + V_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + V_x \frac{\partial S}{\partial x} + V_y \frac{\partial S}{\partial y} + V_z \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{Pc \times c}{Tc}$$

Después de aplicar las inferencias mencionadas anteriormente se obtiene:

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} = - \frac{\partial P}{\partial x} \times \frac{1}{\rho}$$

Al trabajar con derivadas parciales en función de varias variables, se aplica la transformación matemática de derivar en función de una variable, con este fin se emplea la magnitud física tiempo definiéndose por

$$t=0.0015\sqrt{R}\sqrt[6]{g}$$

Obteniéndose finalmente:

$$V_p = \left[P \times \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right) \times g \right]^{1/2}$$

Donde:

ρ_0 : Densidad del aire del frente de onda (kg/m³)

ρ : Densidad del frente de onda (kg/m³)

P : Presión de la onda de choque (P_a).

R : Distancia de la explosión (m)

V_p : Velocidad de propagación (m/s)

g : Constante de gravedad (9.8m/s)

Considerando que la explosión se comporta como un gas real, se plantea la ecuación de estado que caracteriza este fenómeno $P = \delta \times R \times T$

Donde:

P : Presión (P_a).

δ : Densidad (kg/m³)

T : Temperatura. (Kelvin = °C + 273)

R : Constante de Reynolds $(0.082 \frac{lits * atm}{mol * K})$

Las explosiones aéreas pueden suceder a una determinada altura o en la superficie del terreno.

Las explosiones aéreas no confinadas ocurren en la superficie del terreno o en el aire, determinándose la carga en dependencia de la condición. Si el fenómeno ocurre en el aire la carga es equivalente a la masa SE ($q = M_{se}$) y si es en la superficie la carga es igual al doble de la masa SE ($q = 2M_{se}$).

Las explosiones semiconfinadas y no confinadas tienen lugar en las superficies del terreno donde la carga es equivalente a la masa de la SE. ($q = m$).

Modelos para el cálculo de la sobrepresión

- Modelos de Sadovski.
- Modelos de Sadov.
- Modelos de Stakinovich.
- Modelo para las explosiones semiconfinadas.
- Modelo para las explosiones confinadas.

Los modelos mencionados determinan la presión (ΔP) en el frente de la onda de choque de la explosión aérea teniendo en cuenta las condiciones de contornos y distancias. Estos modelos están validados experimentalmente. Los modelos de Sadovski, Sadov y Stakinovich se emplean en las zonas no confinadas y los posteriores en zonas semiconfinadas y no confinadas respectivamente.

Modelo de Sadovski

El Modelo de Sadovski plantea una expresión matemática comprensible. Es considerado un modelo sencillo y flexible desde el punto de vista físico-matemático y el más adecuado al coincidir los resultados con los experimentos realizados y al obtener diferencias mínimas. Las restricciones de distancia están dadas por las expresiones ($R < 15R_0$) y ($R \geq 15R_0$).

Para cuando $R \leq 15R_0$

$$\Delta P = 4 \times 10^{-5} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3.6} - 1$$

$$R_0 = 0.053 \sqrt[3]{q}$$

Para cuando $R > 15R_0$

$$\Delta P = \frac{7q}{R^3} + 2.7 \frac{q^{2/3}}{R^2} + 0.84 \frac{q^{1/3}}{R}$$

Donde:

ΔP : Sobrepresión (P_a ó N/m^2)

R_0 : Radio de la carga reducida a la forma esférica (m)

R : Distancia al centro de la explosión (m)

q : masa de sustancia explosiva. (kg)

Modelo de Sadov

Las explosiones aéreas tienen como característica intrínseca un frente de onda que influye en su comportamiento. El Modelo de Sadov emplea las condiciones de distancia y tiene en cuenta la forma de la carga de la sustancia explosiva (SE).

Para $R < 15R_0$

$$E = m_c P_c$$

$$E = m_c P_c$$

$$\Delta P = \frac{16 E (1.033)^5}{25 (\gamma + 1)} \times \frac{1}{R^3}$$

Donde:

ΔP : Sobrepresión en el frente de onda (P_a)

E : Energía de la onda (J)

R : Distancia a la explosión (m)

m_c : masa de sustancia explosiva (kg)

P_c : Potencia calorífica (4200 J/Kg)

γ : Constante de los gases.

Para cuando $R \geq 15 R_0$ se considera la forma del tipo de carga (esférica o cilíndrica)

En la cual:

$$K' = \sqrt{\frac{\delta_c^{1/3} V_c \times P_c \times \delta \times C}{4\pi K}}$$

Para la carga cilíndrica de radio R y longitud L :

$$K = \sqrt[3]{\frac{R}{\pi L}}$$

Para una carga esférica.

$$K = \sqrt[3]{\frac{4}{3} \pi}$$

Donde:

ΔP : Sobrepresión (P_a).

C : Velocidad del sonido (340 m/s).

δ : Densidad del aire en el frente de onda (6 kg/m³).

V_c : Velocidad de combustión del explosivo (5000 m/s).

δ_c : Densidad de la carga (1400 kg/m³).

m_c : Masa de la carga (kg).

R : Distancia de la explosión (m).

K : Constante de la forma carga.

Modelo de Stakinovich

El Modelo de Stakinovich involucra los parámetros que caracterizan al movimiento del frente de onda: la velocidad del frente de la onda de choque y la densidad.

$$\Delta P = \frac{2}{1.4+1} \times \delta_a \times D_{yd}^2$$

$$D_{yd} = 0.4 \frac{R}{t}$$

Donde:

ΔP : Sobrepresión (Pa ó N/m²)

D_{yd} : Velocidad de propagación de las ondas de choque (m/s)

δ_a : Densidad del aire (kg/m³)

R : Distancia al centro de la explosión (m)

t : Tiempo (s)

Modelo para las explosiones semiconfinadas

Emplea el modelo de Sadovski adaptado a las condiciones de las zonas semiconfinadas.

$$h = R \times \tan \alpha$$

$$A = b \times h$$

$$V = A \times R$$

$$B = \arctan \frac{b}{h}$$

$$\Delta P = 7 \frac{m_{se}}{V} + 2.7 \left(\frac{R^3}{V} \right)^{2/3} + \left(\frac{m_{se}}{R^2} \right)^{2/3} + 0.84 \left(\frac{m_{se}^{1/3}}{R} \right)$$

Donde:

ΔP : Presión (Pa)

h : Altura de la zona semiconfinada. (m)

A : Área de la zona semiconfinada (m²)

V : Volumen de la zona semiconfinada (m³)

b : Base de la zona semiconfinada (m)

B : Ancho de la zona semiconfinada (m)

Modelo para las explosiones confinadas

Emplea el modelo de Sadvski adaptado a las condiciones de las zonas confinadas teniendo en cuenta la entrada y el interior de la zona.

Entrada de la zona confinada.

$$\Delta P = \left(\frac{3270 * m_{se} * kx}{R * A} + 780 \sqrt{\frac{m_{se} * kx}{R * A}} \right) \times e^{-B/D * R}$$

Interior de la zona confinada.

$$\Delta P = 44 \left(\frac{m_{se} * km}{A * R} \right) + 9,2 \left(\frac{m_{se} * km}{A * R} \right)^{2/3} + 1,46 \left(\frac{m_{se} * km}{A * R} \right)$$

Donde:

ΔP : Presión en la entrada de la zona confinada.

m_{se} : Masa de la sustancia explosiva (kg)

kx : Este coeficiente depende de la colocación de la carga (adimensional)

A : Área de la zona confinada (m^2)

R : Distancia de la explosión (m)

B : Coeficiente de rugosidad (adimensional)

D : Diámetro equivalente de la sección transversal del pozo (m)

km : Constante de cualquier explosivo al TNT (adimensional).

Modelo para el cálculo del tiempo de acción

Es necesario considerar el tiempo que demora la onda en desplazarse desde el lugar de la explosión hasta el punto de interés.

Tiempo que se demora la onda en desplazarse desde el lugar de la explosión hasta el punto de interés.

$$t_1 = \frac{R}{\sqrt{\Delta P \left(\frac{1}{\delta_0} - \frac{1}{\delta} \right) g}}$$

Donde la densidad de la onda de choque es:

$$\delta_h = \delta_0 \times \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}$$

Donde:

t : Tiempo de acción de los gases. (s)

t_1 : Tiempo de propagación de los gases. (s)

δ_0 : Densidad del aire (kg/m³)

δ : Densidad de la onda de choque (Kg/m³)

g : Constante de la gravedad (9,8 m/*s)

R : Distancia al centro de la explosión (m)

γ : Constante adiabática de los gases (1.4)

Modelo para el cálculo de la velocidad

La velocidad de propagación de la onda de choque que desarrolla la explosión aérea depende de los parámetros densidad y presión.

$$V_p = \left[\Delta P \times \left(\frac{1}{\delta_0} - \frac{1}{\delta} \right) \times g \right]^{1/2}$$

Donde:

ΔP : Sobrepresión (P_a)

δ_0 : Densidad del aire 1.4 kg/m³

δ : Densidad de la onda de choque (Kg/m³)

g : Constante de la gravedad (9,8 m/s)

V_s : Velocidad del sonido (340m/s)

Modelo para el cálculo de la temperatura

La temperatura que se alcanza en el frente de onda de una explosión se determina por la siguiente expresión:

$$T_h = T_a \times \sqrt[3.5]{\frac{\Delta P}{P_a}}$$

Donde:

T_h : Temperatura de onda de choque (Kelvin = °C + 273)

P_a : Presión atmosférica (P_a)

ΔP : Presión de onda de choque (P_a)

CONSIDERACIONES

Para el desarrollo de este capítulo se realizó una búsqueda, en conjunto con la FAR, de los principales modelos matemáticos que describen el comportamiento físico de las explosiones aéreas y sus parámetros destructivos.

Debido al proceso complejo y riesgoso de la explosión aérea se hace necesario dar la posibilidad de seleccionar el modelo para simular la predicción de los efectos destructivos de la misma brindando un carácter universal al algoritmo que se modela.

CAPÍTULO 3

PROPUESTA DEL ALGORITMO

En este capítulo se realiza la propuesta del algoritmo teniendo en cuenta las limitantes del algoritmo analizado y empleando los modelos matemáticos estudiados. Se plasma un estudio de las funcionalidades del algoritmo y se determina su eficiencia, proporcionando una solución eficaz, fiable y robusta. Se proponen las posibles soluciones técnicas para la futura implementación y visualización de algoritmo

3.1 PROPUESTA DE ALGORITMO SIMULACIÓN DE LAS EXPLOSIONES AÉREAS

Las simulaciones de explosiones aéreas es un proceso complejo en el cual se emplean algoritmos que se apoyan en modelos matemáticos que permiten simular su comportamiento físico.

El algoritmo analizado en el capítulo 1 permite simular las explosiones aéreas empleando el cálculo de un solo parámetro físico (presión) mediante un modelo matemático que tiene como principales valores de entrada: masa de la sustancia explosiva y una distancia a la que se desea simular la explosión, obviando la relación que existe entre los restantes parámetros como temperatura, tiempo y velocidad con respecto a la presión. Esta situación provoca que no se puedan realizar investigaciones ni comparaciones en cuanto al desarrollo del fenómeno, limitando su simulación y con ello las condiciones de contorno (no confinadas, semiconfinadas y confinadas) que se que requieren para ser modeladas en los simuladores de tiro.

Atendiendo a esta situación se precisa modelar un algoritmo eficiente que permita emplear un conjunto de distancias y una carga como valores de entrada principales, determinando la presión de acuerdo al modelo seleccionado y los parámetros relacionados con esta, mostrando los valores obtenidos.

El algoritmo que se modeló cumple con el propósito mencionado. De forma general, el algoritmo determina la presión realizando la selección del modelo matemático y los parámetros asociados a esta (temperatura, velocidad y tiempo), mediante un ciclo por variable de control que recorre un conjunto de distancias y guarda los valores de las magnitudes físicas en un arreglo de estructuras de un tipo de dato creado llamado Explosión. Para mostrar los valores obtenidos y observar la variación de los parámetros

físicos se realiza un ciclo por variable de control donde se verifica la ecuación de estado que rigen las explosiones aéreas.

Para escoger el modelo matemático se le asigna un identificador con el propósito de lograr un mejor trabajo del algoritmo.

Modelo de Sadovski.....Id=1

Modelo de Sadov..... Id =2

Modelo de Stakinovich..... Id =3

Modelo de Explosión semiconfinada..... Id =4

Modelo de Explosión confinada..... Id =5

Se empleó una estructura llamada Explosión que tiene los parámetros: presión, temperatura, tiempo y velocidad y un arreglo Parámetro [] para almacenar y manipular los datos manteniendo la relación que existe entre ellos.

A continuación se presenta los pasos del algoritmo y el diagrama de flujo correspondiente para comprender mejor su funcionalidad y las funciones que intervienen en su desarrollo. (Anexo2)

Algoritmo: Simulación de las explosiones aéreas

Inicio

1. Se solicitan los datos de entrada.
2. Almacenar los datos.
3. Recorrer el arreglo de distancia hasta la cantidad con incremento 1 hacer
 - 3.1 Declarar variables auxiliares.
 - 3.2 En caso que el identificador de modelo
 - 3.2.1 Si es 1, realizar el modelo de Sadovski.
 - 3.2.2 Si es 2, realizar el modelo de Sadov.

3.2.3 Si es 3, realizar el modelo de Stakinovich.

3.2.4 Si es 4, realizar el modelo de explosiones aéreas semiconfinadas.

3.2.5 Si es 5, realizar el modelo de explosiones confinadas.

3.2.6 Fin en caso que.

3.3 Guardar la presión obtenida en un arreglo de estructura Explosión

3.4 Determinar la velocidad de propagación de la explosión para la presión alcanzada.

3.5 Guardar la velocidad obtenida en un arreglo de estructura Explosión

3.6 Determinar la temperatura para la presión alcanzada.

3.7 Guardar la temperatura obtenida en un arreglo de estructura Explosión.

3.8 Determinar el tiempo de propagación para la presión alcanzada.

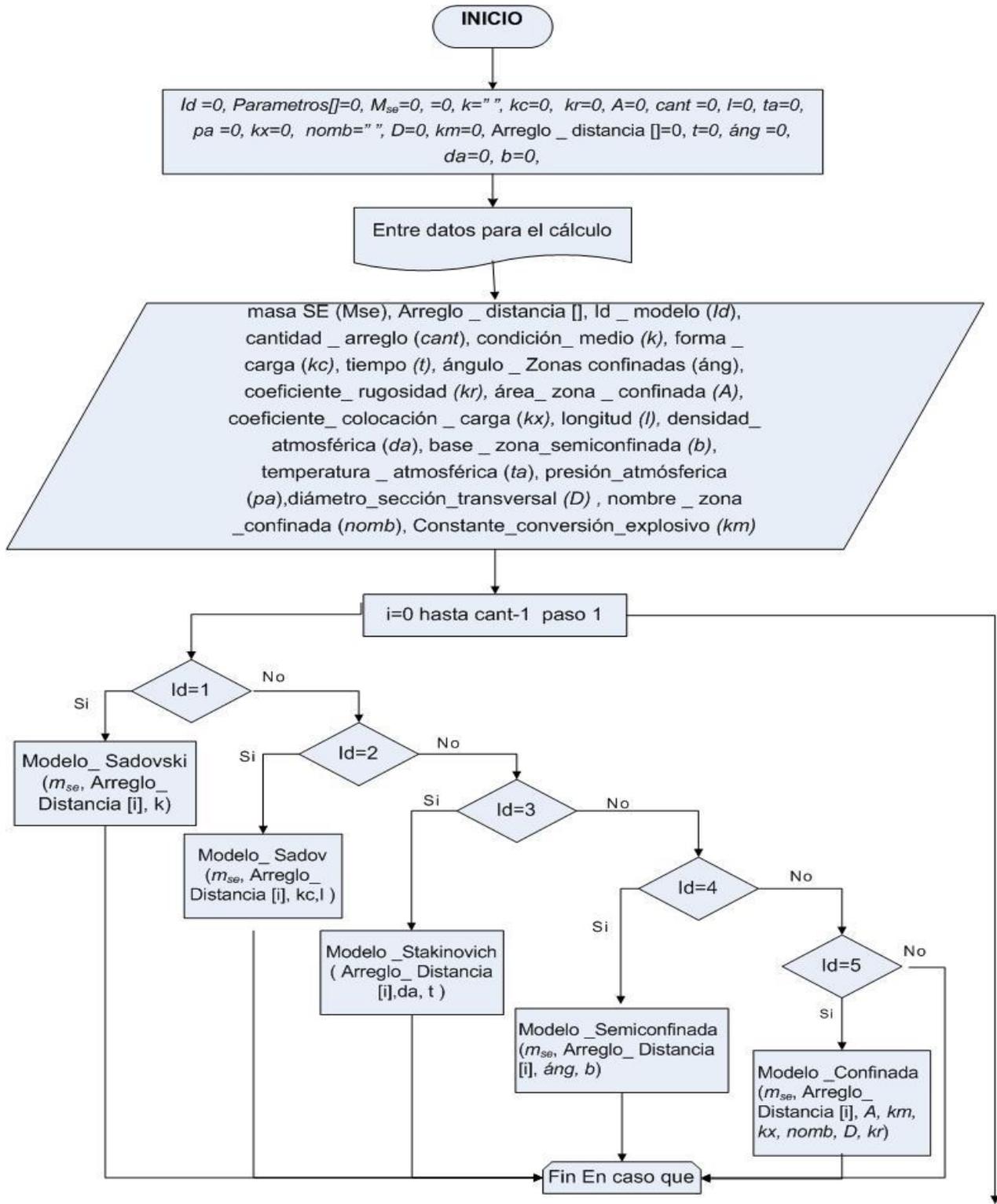
3.9 Guardar el tiempo obtenido en un arreglo de estructura Explosión

4 Recorrer el arreglo de distancia hasta la cantidad con incremento 1

4.1 Si la ecuación de estado es válida entonces mostrar el arreglo de estructura.

4.2 Si no se cumple el paso 4.1 entonces mostrar un mensaje "Error de Modelación"

Fin



Az\

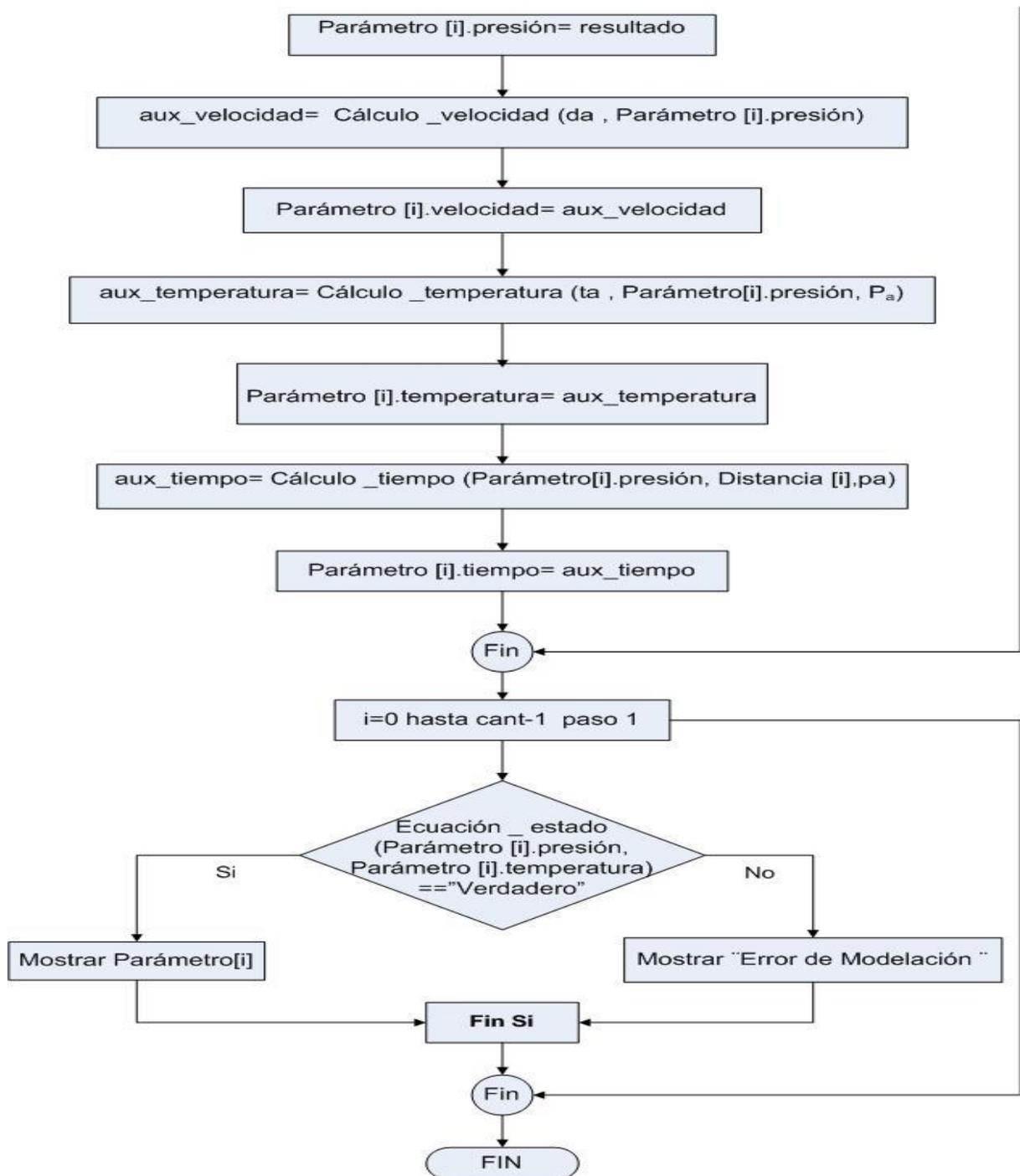


Figura 3.1 Algoritmo Simulación de las explosiones aéreas.

3.2 PSEUDOCÓDIGO DEL ALGORITMO: SIMULACIÓN DE LAS EXPLOSIONES AÉREAS

En este epígrafe se presenta el pseudocódigo del algoritmo y de las funciones auxiliares para determinar posteriormente su eficiencia

Nombre: Simulación de Explosiones aéreas.

Descripción: El algoritmo realiza la simulación de las explosiones aéreas mediante la selección de un modelo matemático que calcula la presión para un arreglo de distancias, determinando las magnitudes temperatura, velocidad y tiempo asociado a esta magnitud. Muestra los valores obtenidos verificando la ecuación de estado.

Variables de entrada: masa_ sustancia explosiva (m_{se}), Arreglo_Distancia, Id_modelo (Id), cantidad_arreglo (cant), condición_ medio (k), forma _carga (kc), tiempo (t), ángulo_zonas semiconfinadas (áng), coeficiente_rugosidad (kr), área_zonaconfinada (A), coeficiente_colocación_carga (kx), longitud (l), densidad_atmosférica (d_a), base_zona (b), temperatura_atmosférica (T_a), presión_atmosferica (P_a), diámetro_ sección transversal (D), nombre_zona (nomb), Constante_conversión_explosivo (km),

Precondiciones: La cantidad de elementos del arreglo de distancias (cant) es un número natural.

La cantidad de elementos del arreglo de distancias (cant) es mayor que cero.

Los elementos del Arreglo _ distancia son números racionales.

El identificador del modelo es un número natural y está en un rango de 1 a 5.

Los valores de entrada kc, t, áng, kr, A, l, d_a , b, T_a , P_a , kx, D, km son números racionales.

Los valores de entrada k, nomb son caracteres.

Poscondiciones: Las variables de salida Parámetro [i] es un arreglo de la estructura Explosión.

Los elementos de la estructura son números racionales.

Inicio

Hacer $ld=0$, $Parámetro [] =0$, $Arreglo_Distancia []=0$, $m_{se}=0$, $áng =0$, $k=0$, $kc=0$, $kr=0$, $A=0$, $cant =0$, $l=0$, $d_a=0$, $P_a =0$, $T_a =0$, $kx=0$, $nomb=""$, $D=0$, $km=0$, $b=0$0

Mostrar "Guardar datos para el cálculo"

Almacenar datos de entrada: ld , $Arreglo_Distancia []$, $áng$, k , kc , kr , A , $cant$, l , b , d_a , P_a , T_a , kx , $nomb$, D , km , m_{se} .

Para $i=0$ **hasta** $cant-1$ **paso** 1.....1

 real resultado = 0.....2

 real aux_temperatura =0.....3

 real aux_velocidad=0.....4

 real aux_tiempo =0.....5

En caso que (ld)6

 1: resultado = Modelo_Sadovski (m_{se} , $Arreglo_Distancia [i]$, k); **break**.....7

 2: resultado = Modelo_Sadov (m_{se} , $Arreglo_Distancia [i]$, kc,l , k); **break**.....8

 3: resultado = Modelo_Stakinovich ($Arreglo_Distancia [i]$, d_a , t , k); **break**.....9

 4: resultado = Modelo_Semiconfinada (m_{se} , $Arreglo_Distancia [i]$, $áng$, b); **break**.....10

 5: resultado = Modelo_Confinada (m_{se} , $Arreglo_Distancia [i]$, A ., km , kx , $nomb$, D , kr)
break.....11

Fin en caso que12

 Parámetro[i] .presión= resultado.....13

 aux_velocidad= Cálculo _velocidad (d_a , Parámetro[i].presión).....14

 Parámetro[i] .velocidad= aux_velocidad.....15

 aux_temperatura= Cálculo _temperatura (T_a , Parámetro[i] .presión, P_a).....16

 Parámetro[i] .temperatura= aux_temperatura.....17

aux_tiempo= Cálculo _tiempo (Parámetro[i] .presión, Arreglo_Distancia [i], d _a).....	18
Parámetro[i] .tiempo= aux_tiempo.....	19
Fin Para	20
Para i=0 hasta cant-1 paso 1.....	21
Si (Ecuación_estado (Parámetro[i] .presión, Parámetro[i] .temperatura, d _a) =="Verdadero") entonces	22
Mostrar Parámetro [i].....	23
Sino	
Mostrar "Error de Modelación".....	24
Fin Si	25
Fin Para	26

Fin

Nombre: Modelo_ Sadovski

Descripción: Determina la presión empleando el modelo de Sadovski en las zonas no confinadas.

Valores de entrada: masa SE, distancia, condición _ medio.

Valores de salida: Presión

Precondiciones: Los valores de entrada son valores racionales positivos.

Poscondiciones: Los valores de salida son valores racionales positivos y no nulos.

Función Modelo_ Sadovski (m_{se}, R, k)

Inicio

$$\Delta P = 0$$

Si (k=="aire") **entonces**

$$q = m_{se}$$

Sino

$$q = 2m_{se}$$

Fin Si

$$R_0 = 0.053 \sqrt[3]{q}$$

Si ($R > 15 R_0$) **entonces**

$$\Delta P = \frac{7q}{R^3} + 2.7 \frac{q^{2/3}}{R^2} + 0.84 \frac{q^{1/3}}{R}$$

Sino

$$\Delta P = 4 \times 10^{-5} \left(\frac{R_o}{R} \right)^{3.6} - 1$$

Fin Si

Fin

Nombre: Modelo_ Sadov

Descripción: Determina la presión empleando el modelo de Sadov en las zonas no confinadas.

Valores de entrada: masa SE, distancia, condición _ medio, forma _ carga, longitud

Valores de salida: Presión

Precondiciones: Los valores de entrada son valores racionales positivos.

Poscondiciones: Los valores de salida son valores racionales positivos y no nulos.

Función Modelo_ Sadov (m_{se} , R , k , kc , l)

Inicio

$$\Delta P = 0$$

Potencia calorífica $P_c = 4200$

Constante adiabática $A_d = 1,4$

Velocidad del sonido $C = 340 \text{ m/s}$.

Densidad atmosférica $d_a = 6 \text{ kg/m}^3$.

Velocidad de combustión $V_c = 5000 \text{ m/s}$

Densidad de la carga $d_{ac} = 1400 \text{ kg/m}^3$

real $E = 0, K' = 0$

Si ($k = \text{"aire"}$) **entonces**

$$q = m_{se}$$

Sino

$$q = 2m_{se}$$

Fin Si

$$R_0 = 0.053 \sqrt[3]{q}$$

Si ($R < 15 R_0$) **entonces**

$$E = m_c P_c$$

$$\Delta P = 16 E \left(\frac{0.033}{25} \left(k + 1 \right) \right) 1/R^3$$

Sino

Si ($kc = \text{"cilíndrica"}$) **entonces**

$$K = \sqrt[3]{\frac{R}{\pi l}}$$

Sino

$$K = \sqrt[3]{\frac{4}{3} \pi}$$

Fin Si

$$K' = \sqrt{\frac{d_{ac}^{1/3} \times V_c \times P_c \times d_a C}{4\pi K}}$$

$$\Delta P = K' \frac{\sqrt{m_{se}}}{R}$$

Fin Si

Fin

Nombre: Modelo_ Stakinovich

Descripción: Determina la presión empleando el modelo de Stakinovich en las zonas no confinadas.

Valores de entrada: densidad _atmosférica, distancia, tiempo, condición _ medio, masa de sustancia explosiva

Valores de salida: Presión

Precondiciones: Los valores de entrada son valores racionales positivos.

Poscondiciones: Los valores de salida son valores racionales positivos y no nulos.

Función Modelo_ Stakinovich (d_a , R , t , k , m_{se})

Inicio

$$\Delta P = 0$$

Si ($k == \text{"aire"}$) **entonces**

$$q = m_{se}$$

Sino

$$q = 2m_{se}$$

Fin Si

$$t = 0.0015 \times \sqrt{R} \times \sqrt[6]{q}$$

$$D_{yd} = 0.4 \frac{R}{t}$$

$$\Delta P = \frac{2}{1.4 + 1} \times d_a \times D_{yd}^2$$

Fin

Nombre: Modelo_ Semiconfinada

Descripción: Determina la presión en la zonas semiconfinadas,

Valores de entrada: masa SE, distancia, ángulo, base, coeficiente de rugosidad

Valores de salida: Presión

Precondiciones: Los valores de entrada son valores racionales positivos.

Poscondiciones: Los valores de salida son valores racionales positivos y no nulos.

Función Modelo_ Semiconfinada (m_{se} , R , áng , b)

Inicio

$$\Delta P = 0$$

$$h = R \times \tan \text{áng}$$

$$A = b \times h$$

$$V = A \times R$$

$$B = \arctan \frac{b}{h}$$

$$\Delta P = 7 \frac{m_{se}}{V} + 2.7 \left(\frac{R^3}{V} \right)^{2/3} + \left(\frac{m_{se}}{R^2} \right)^{2/3} + 0.84 \left(\frac{m_{se}^{1/3}}{R} \right)$$

$$\Delta P$$

Fin

Nombre: Modelo_Confinada.

Descripción: Determina la presión de la onda de choque en la zonas confinadas.

Valores de entrada: nombre_explosión, masa SE, distancia, coeficiente de rugosidad, diámetro equivalente a la sección transversal, constante de cualquier explosivo al TNT, coeficiente de colocación.

Valores de salida: Presión

Precondiciones: Los valores de entrada son valores racionales positivos.

Poscondiciones: Los valores de salida son valores racionales positivos y no nulos.

Función Modelo_Confinadas (m_{se} , R , D , A , $nomb$, kr , kx , km)

Inicio

$$\Delta P = 0$$

Si ($nomb == \text{"Entrada_zona_confinada"}$) **entonces**

$$\Delta P = \left(\frac{3270 * m_{se} * kx}{R * A} + 780 \sqrt{\frac{m_{se} * kx}{R * A}} \right) \times e^{-B/D * R}$$

Sino

$$\Delta P = 44 \left(\frac{m_{se} * km}{A * R} \right) + 9,2 \left(\frac{m_{se} * km}{A * R} \right)^{2/3} + 1,46 \left(\frac{m_{se} * km}{A * R} \right)$$

Fin Si

Fin

Nombre: Cálculo_Velocidad

Descripción: Determina la velocidad de propagación de la onda de choque.

Valores de entrada: presión, densidad _ atmosférica.

Valores de salida: Velocidad de propagación de la onda de choque.

Precondiciones: Los valores de entrada son valores racionales positivos.

Poscondiciones: Los valores de salida son valores racionales positivos y no nulos.

Función Cálculo_Velocidad (ΔP , d_a)

Inicio

$$V_p=0,$$

Constante adiabática $A_d=1,4$

Constante de gravedad $g=9.8\text{m/s}^2$

$$de = d_a \times \frac{A_d + 1}{A_d - 1}$$

$$V_p = \left[\Delta P \times \left(\frac{1}{d_a} - \frac{1}{de} \right) \times g \right]^{1/2}$$

Fin

Nombre: Cálculo_Temperatura

Descripción: Determina la temperatura de la onda de choque.

Valores de entrada: presión, presión _atmosférica, temperatura _atmosférica

Valores de salida: Temperatura

Precondiciones: Los valores de entrada son valores racionales positivos.

Poscondiciones: Los valores de salida son valores racionales positivos y no nulos.

Función Cálculo_Temperatura (ΔP , P_a , T_a)

Inicio

$$T_h=0,$$

$$T_h = T_a \times \sqrt[3.5]{\frac{\Delta P}{P_a}}$$

Fin

Nombre: Cálculo _Tiempo.

Descripción: Determina el tiempo de propagación de los gases de la explosión.

Valores de entrada: presión, distancia, densidad _ atmosférica, densidad.

Valores de salida: Tiempo.

Precondiciones: Los valores de entrada son valores racionales positivos.

Poscondiciones: Los valores de salida son valores racionales positivos y no nulos.

Función Cálculo_Tiempo ($\Delta P, d_a$)

Inicio

, $t_1=0$,

Constante de gravedad $g = 9,8 \text{ m/s}^2$

real $d_e=0$

$$d_e = d_a \times \frac{A_d + 1}{A_d - 1}$$

$$t_1 = \frac{R}{\sqrt{\Delta P \times \left(\frac{1}{d_a} - \frac{1}{d_e}\right) \times g}}$$

Fin

Nombre: Ecuación _ estado

Descripción: Permite validar la ecuación de estado de la explosiones aéreas.

Valores de entrada: presión, temperatura, densidad atmosférica.

Valores de salida: verdadero o falso.

Precondiciones: Los valores de entrada son valores racionales positivos.

Poscondiciones: Los valores de salida son valores racionales positivos y no nulos.

Función Ecuación _ estado (ΔP , d_a , T)

Inicio

Constante Reynolds=0.082

real auxiliar

$$de = d_a \times \frac{A_d + 1}{A_d - 1}$$

Auxiliar = $R \times de \times T$

Si ($\Delta P ==$ auxiliar) **entonces**

Mostrar "verdadero"

Si no

Mostrar "Falso"

Fin si

Fin

3.3 EFICIENCIA DEL ALGORITMO: SIMULACIÓN DE LAS EXPLOSIONES AÉREAS

Un algoritmo es eficiente cuando logra llegar a sus objetivos planteados utilizando la menor cantidad de recursos posibles: memoria y tiempo.

Para determinar la eficiencia del algoritmo se realiza un análisis teórico de la cantidad de tiempo de ejecución (complejidad temporal) que requiere. Este análisis proporciona una medida a priori, que consiste en obtener una función que acote (superior o inferiormente) el tiempo de ejecución del algoritmo para cualquier instancia.

La unidad de tiempo a la que deben hacer referencia estas medidas de eficiencia no puede ser expresada en segundos o en otra unidad de tiempo, pues no existe un ordenador estándar al que puedan hacer

referencia todas las medidas. El tiempo de ejecución se denota como $T(n)$ y mide el número de operaciones elementales básicas que realiza el algoritmo para un tamaño de entrada dado y una entrada específica. Se denomina tamaño de la entrada al número de componentes sobre los que se va a ejecutar el algoritmo y se consideran como operaciones elementales (OE): operaciones aritméticas básicas, asignaciones a variables, saltos, comparaciones lógicas y el acceso a estructuras indexadas básicas, como los vectores y matrices, contabilizando cada una como 1 OE.

Es importante destacar que el comportamiento de un algoritmo puede cambiar notablemente para distintas entradas por lo que existen variantes en la estimación del tiempo de ejecución de un algoritmo:

- Tiempo en el caso mejor: se corresponde con el menor de los tiempos requeridos por el algoritmo para ejecutarse con cada una de las instancias.
- Tiempo en el caso peor: se corresponde con el mayor de los tiempos requeridos por el algoritmo para ejecutarse con cada una de las instancias.
- Tiempo en el caso promedio: se corresponde con la división de la suma de los tiempos requeridos por el algoritmo para ejecutarse cada una de las instancias entre el total de estas.

Se obtiene las siguientes operaciones elementales:

1. *En el caso de las funciones que describen los modelos matemáticos para el cálculo de parámetros:*

Para el Modelo_Sadovski se obtiene 8OE para un tiempo de ejecución de $T(n)=8$ y complejidad $O(1)$.

Para el Modelo_Sadov se obtiene 17OE para un tiempo de ejecución de $T(n)=17$ y complejidad $O(1)$.

Para el Modelo_Stakinovich se obtiene 8OE para un tiempo de ejecución de $T(n)=8$ y complejidad $O(1)$.

Para el Modelo_Semiconfinada se obtiene 8OE para un tiempo de ejecución de $T(n)=8$ y complejidad $O(1)$.

Para el Modelo_Confinada se obtiene 7OE para un tiempo de ejecución de $T(n)=7$ y complejidad $O(1)$.

Para el Cálculo_Velocidad se obtiene 6OE para un tiempo de ejecución de $T(n)=6$ y complejidad $O(1)$.

Para el Cálculo_Temperatura se obtiene 2OE para un tiempo de ejecución de $T(n)=2$ y complejidad $O(1)$.

Para el Cálculo_Tiempo se obtiene 5OE para un tiempo de ejecución de $T(n)=5$ y complejidad $O(1)$.

Para la Ecuación_estado se obtiene 7OE para un tiempo de ejecución de $T(n)=7$ y complejidad $O(1)$.

2. *En el caso del algoritmo:*

En la línea 0 se ejecutan 19 OE (inicialización de variables).

En la línea 1(donde se ejecuta el ciclo **Para**) se realizan 3 OE. (Inicialización, incremento y una comparación)

De la línea 2 a la línea 5 (Inicialización de variables) se realizan 4 OE.

En la línea 6 (ejecución del instrucción **En caso que**) se realiza 1 OE.

En las líneas 7 se realizan 3 OE (asignación, llamada a función y acceso).

En la línea 8 se realizan 3OE (Asignación, llamada a función y acceso).

En la línea 9 se realizan 3OE (Asignación, llamada a función y acceso).

En la línea 10 se realizan 3OE (Asignación, llamada a función y acceso).

En la línea 11 se realizan 3OE (Asignación, llamada a función y acceso).

En la línea 12 (**Fin de En caso que**) se realiza 1 OE.

En la línea 13 se realizan 2 OE. (Asignación y acceso).

En la línea 14 se realizan 3 OE. (Asignación, llamada a función y acceso).

En la línea 15 se realizan 2 OE. (Asignación y acceso).

En la línea 16 se realizan 3 OE. (Asignación, llamada a función y acceso).

En la línea 17 se realizan 2 OE. (Asignación y acceso).

En la línea 18 se realizan 3 OE. (Asignación, llamada a función y acceso).

En la línea 19 se realizan 2 OE. (Asignación y acceso).

En la línea 20 (**Fin de Para**) se realizan 1 OE.

En la línea 21 (donde se ejecuta el ciclo **Para**) se realizan 3 OE. (Inicialización, incremento y una comparación)

En la línea 22(ejecución de **Si**) se realizan 4 OE. (Llamada a función, comparación y 2 accesos).

En la línea 23 (**Mostrar** arreglos) 1 OE

En la línea 24) (**Mostrar** mensaje) 1 OE

En la línea 25 ((**Fin** de **Si**) se realizan 1 OE.

En la línea 26 **Fin** de **Para**) se realizan 1 OE.

En el *caso mejor*, el algoritmo ejecuta la línea 0 donde se inicializan las variables necesarias para la simulación con 19 OE y no entra a los ciclos por variable de control ya que no considera el arreglo de distancia, luego va al Fin del algoritmo contabilizando una OE.

El tiempo de ejecución es:

$$T(n) = 19 + 1 = 20$$

El tiempo de ejecución obtenido significa que se realiza 20 OE en la ejecución del algoritmo. Para este caso la complejidad es $O(1)$

En el *caso peor*, el bucle se repite $n-1$ veces al efectuar el recorrido por el conjunto de distancias, después se realiza la selección del modelo en la línea 7 y termina de ejecutarse en la línea 13. Luego las líneas (14), (15), (16), (17), (18), (19) ejecutan operaciones de asignación, llamada a funciones y accesos a los arreglos. En la línea 20 se ejecuta un ciclo por variable de control y en su interior la línea 21 realiza una comparación, 2 accesos a un arreglo y una llamada a función. Muestra los parámetros calculados si se cumple la condicional y muestra un error en caso contrario.

El tiempo de ejecución es:

$$T(n) = 19 + \left(\left(\sum_{i=0}^{n-1} (3 + 4 + 3 + 1 + 18) \right) + \sum_{i=0}^{n-1} (3 + 4 + 1 + 1) \right) + 1 = 19 + 29n + 1$$

El tiempo de ejecución obtenido significa que por cada elemento del arreglo de distancia se realizarán 29 instrucciones dentro del ciclo **Para**, determinando los parámetros para la futura simulación. Luego se realiza un ciclo por variable de control donde se chequea una condicional y se muestran los valores presión, temperatura, velocidad y tiempo que están almacenados en el arreglo de estructuras y termina el procedimiento.

La complejidad que posee el algoritmo es una complejidad lineal $O(n)$.

Es importante resaltar que aunque este algoritmo posee una complejidad superior que el analizado en el capítulo 1 ($O(1)$) lejos de representar una desventaja es un aporte significativo, pues admite una mayor cantidad de instrucciones y realiza un estudio más completo de las explosiones aéreas al considerar más cantidad de parámetros dependientes para los valores de la variable independiente distancia.

3.4 APORTES DEL ALGORITMO

Los siguientes aportes del algoritmo brindan la posibilidad de observar, analizar, comparar e investigar como se desarrolla la explosión aérea en los diferentes estados por los que transita.

- El algoritmo propuesto resuelve el problema en una secuencia finita de pasos, los cuales están claramente definidos.
- Introduce nuevos modelos matemáticos como el modelo Sadovski, Sadov y Stakinovich, determinando la presión en las zonas no confinadas y verificando las condiciones de distancia.
- Permite verificar la ecuación de estado que rigen a las explosiones aéreas.
- Determina los parámetros de la explosión aérea: presión, temperatura, velocidad y tiempo asociado a un arreglo de distancias.
- Posee complejidad $O(n)$ al introducir ciclos por variables de control que permite recorrer un arreglo de distancias a la que se desea simular la explosión aérea y mostrar los datos correspondientes.
- Se emplean estructuras para la manipulación y almacenamiento de los datos.

3.5 HERRAMIENTAS PARA LA VISUALIZACIÓN GRÁFICA DEL ALGORITMO

En este epígrafe se propone las soluciones técnicas para la futura visualización e implementación del algoritmo.

Se propone utilizar la librería gráfica OpenGL porque es un software libre multiplataforma y la universidad aspira a migrar a software libre.

Lenguaje de programación: C++, con muy bajo nivel por lo que es muy rápido y óptimo para aplicaciones gráficas, es multiplataforma.

Plataforma: Si se hace un buen diseño de una aplicación por capas, donde se separe bien la parte matemática de la parte gráfica y de la parte que maneja el nivel de aplicación, entonces se puede desarrollar para cualquier plataforma, pues si se implementa el algoritmo en C++ podrá correr en cualquier Sistema Operativo. Se proponen Windows porque es muy difundido y Linux por la tendencia a migrar a Software Libre.

Finalmente se propone el empleo de la herramienta SceneToolkit de la facultad que incorpora los aspectos propuestos anteriormente, a la cual el algoritmo puede ser acoplado como un módulo pues no sirve de nada tener una aplicación que modele las explosiones sino está integrada a algo.

Además se debe tener en cuenta los procesos fundamentales que describen la lógica de su estructura:

- Brindar la posibilidad al usuario de seleccionar los modelos para el cálculo de la presión de acuerdo a las condiciones de contorno donde se produce el fenómeno.
- Determinar los parámetros físicos termodinámicos dependientes de la presión que caracterizan la explosión aérea.
- Mostrar la relación de los parámetros proporcionando la investigación y un análisis del desarrollo de la explosión aérea en los simuladores de tiro.

Para tener una visión profunda de los procesos que se mencionaron se realizó un esquema que relaciona los conceptos fundamentales que se manejan en el algoritmo.

En este diagrama se observa la relación existente entre la explosión aérea y los modelos matemáticos que determinan el parámetro presión de acuerdo a las condiciones donde se produce y los restantes parámetros temperatura, tiempo y velocidad que dependen de la presión.

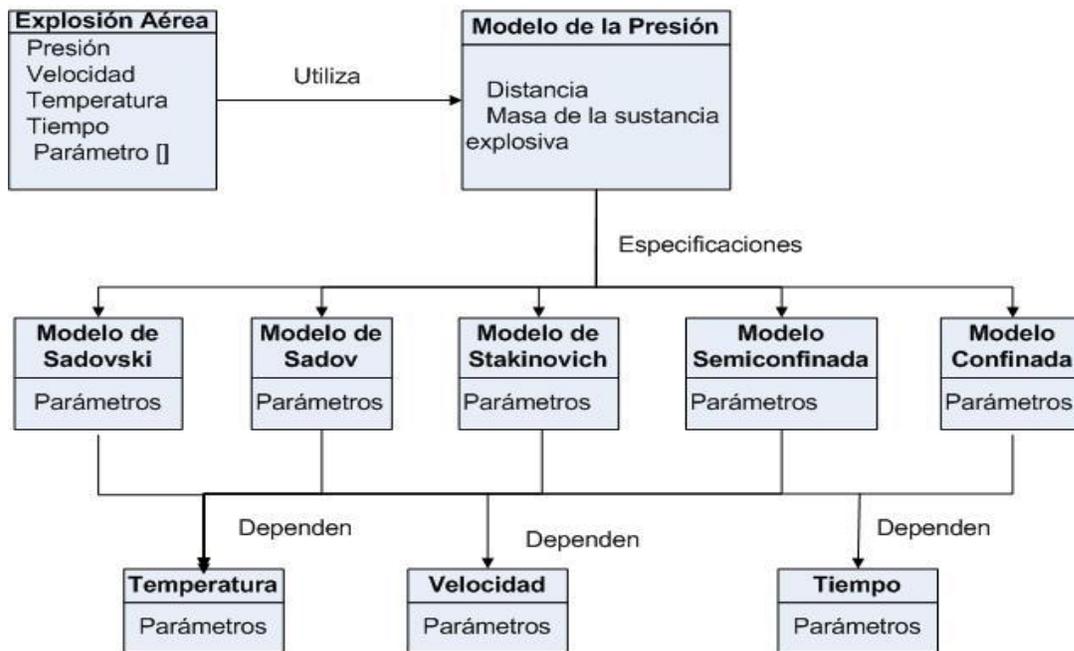


Figura 3.2 Esquema de relación de conceptos

CONSIDERACIONES

En este capítulo se realizó la modelación del algoritmo que permite simular el comportamiento de las explosiones aéreas. Se mostraron los aportes que brinda el algoritmo y se le dieron solución a las limitantes que presenta el algoritmo tomado como punto de partida, realizándose un análisis de su eficiencia. Se proponen la herramienta, librería, lenguaje de programación y plataforma para la futura visualización e implementación del algoritmo.

CONCLUSIONES

- Con la modelación del algoritmo Simulación de explosiones aéreas se da cumplimiento a los objetivos de este trabajo, pues se obtuvo un algoritmo eficiente en el que se aplican los resultados de la investigación realizada a partir del análisis del algoritmo tomado como punto de partida y los modelos matemáticos que describen el comportamiento de las explosiones aéreas.
- El algoritmo brinda la posibilidad de seleccionar el modelo conceptual que cumple con las expectativas del cliente.
- El algoritmo fue desarrollado de forma general y puede agregar todos los modelos matemáticos, imprimiéndole un carácter global.
- El algoritmo es descrito en un lenguaje natural, pseudocódigo y diagramas de actividad permitiendo comprender los procesos que definen su estructura lógica.
- Se presentan las herramientas, lenguajes de programación, librerías gráficas y plataformas para la futura visualización gráfica del algoritmo.
- Este procedimiento permitirá simular las explosiones aéreas con carácter real contribuyendo al rendimiento y productividad de los simuladores de tiro.

Concluido el trabajo de diploma y desarrollada las temáticas que en él se exponen, se logró de modo general una mejora formidable para el rendimiento de los simuladores de tiro.

RECOMENDACIONES

Tomando como base la investigación realizada y la experiencia acumulada durante la realización de este trabajo, se proponen las siguientes recomendaciones:

- Realizar la implementación del algoritmo teniendo en cuenta los aspectos propuestos e incorporarlo a un módulo de los simuladores de tiro.
- Emplearse en varias esferas de desarrollo como el estudio de desastres, minería y en la realización de combates.
- Continuar la investigación en lo referente a la Ingeniería de Software de los efectos de la explosión aérea.
- Realizar una librería (.lib) multiplataforma sin gráficos que contenga funcionalidades para simular explosiones matemáticamente que pueda ser empleada con cualquier librería gráfica.

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TAYLOR, T. *Técnicas de simulación de computadoras*, 1975.

MURTHY, D. N. *Mathematical Modelling*, 1992.

STWART, J. *Precálculo: Matemáticas para el calculo* 2001.

KNUTH, D. E. *El arte de programar ordenadores*, 1968.

ADDISON-WESLAY. *Fundamental Algorithms the art of computer programming*, 1973.

KOZEN, D. C. *The design and analysis of algorithms.*, 1992.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

AUTORES, C. D. Efecto explosivo de las municiones aéreas en: *Manual de estudio de municiones de aviación*. . Ciudad Habana 1982.p.

---. Fundamentos de la teoría de la explosión en: *Manual de estudio de municiones de aviación* Ciudad Habana Instituto Técnico Militar José Martí, 1982.p.

---. Sustancias explosivas en: *Manual de Estudio de Municiones de Aviación* Ciudad Habana Instituto Técnico Militar José Martí, 1982.p.

---. *Técnicas de diseño de algoritmo* 1997.

[Disponible en

:http://teleformacion.uci.cu/mod/resource/view.php?id=10617&subdir=/Tecnicas_de_Disenode_Algoritmos

DAVE ASTLE, K. H. Capítulo 20: Building a Game Engine en: *OpenGL Game Programming*. 2001. p.

DAVE ASTLE, K. H. Capítulo 1: The exploration begins: OpenGL and DirectX. en *OpenGL Game Programming*., 2001.p.

FUCE, F. *Windows o Linux, ventajas y desventajas*, 2003.

[Disponible en: <http://www.pergaminovirtual.com.ar/revista/cgi-bin/hoy/archivos/00000210.shtml>

JIMÉNEZ, A. R. *Complementos informáticos*

Disponible en: <http://www.cs.us.es/cursos/ci/Apuntes/tema-01x4.pdf>

POZO, S. *Curso de C++. Versión 2003*

[Disponible en: <http://www.conclase.net/c/curso/index.php?cap=01>

SANTOS, D. D. L. *Análisis De Algoritmos* 2007.

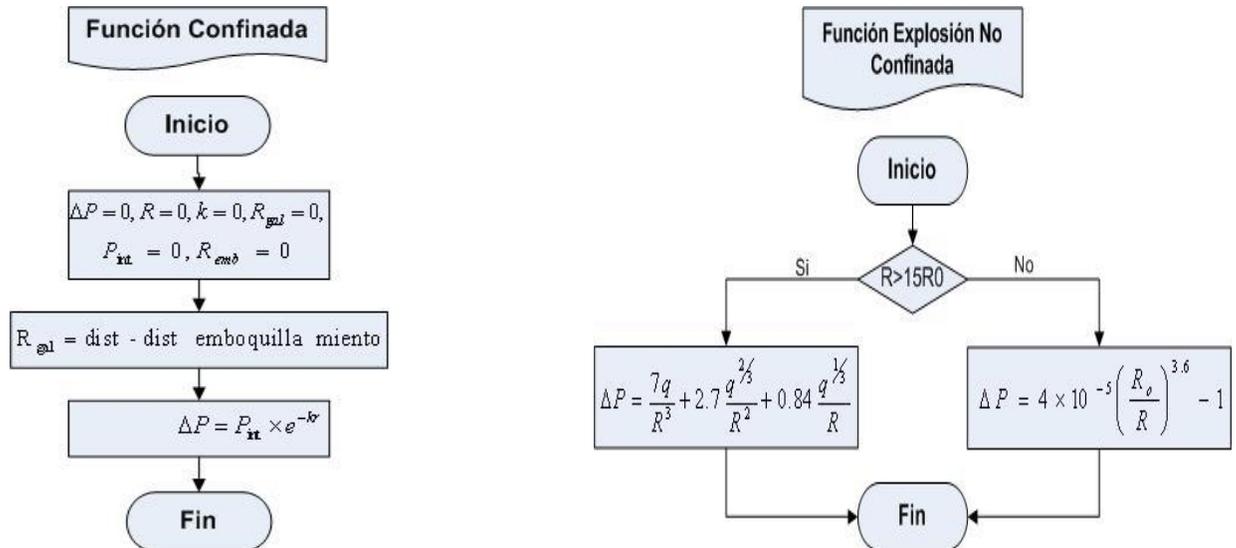
[Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos11/alcom/alcom.shtml>

WorldToolkit Release 7. 1997. [Disponible en <http://www.sense8.com>]

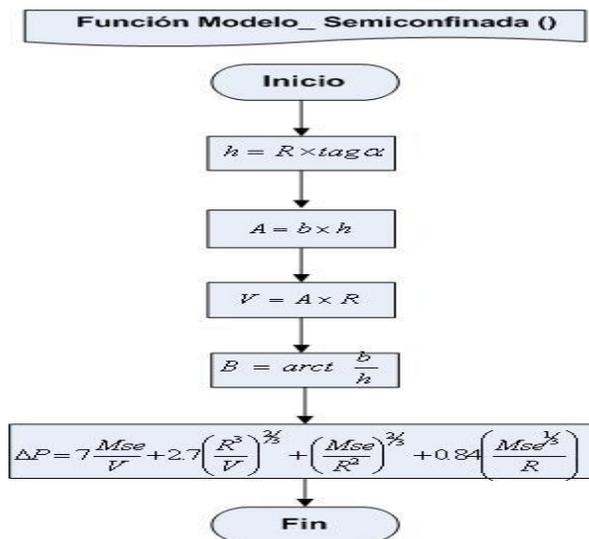
3D-GameStudio. 2007. [Disponible en <http://www.conitec.net/a4info.htm>]

ANEXOS

Anexo 1. Algoritmo: Simulación del comportamiento de las explosiones aéreas. Bloque3.

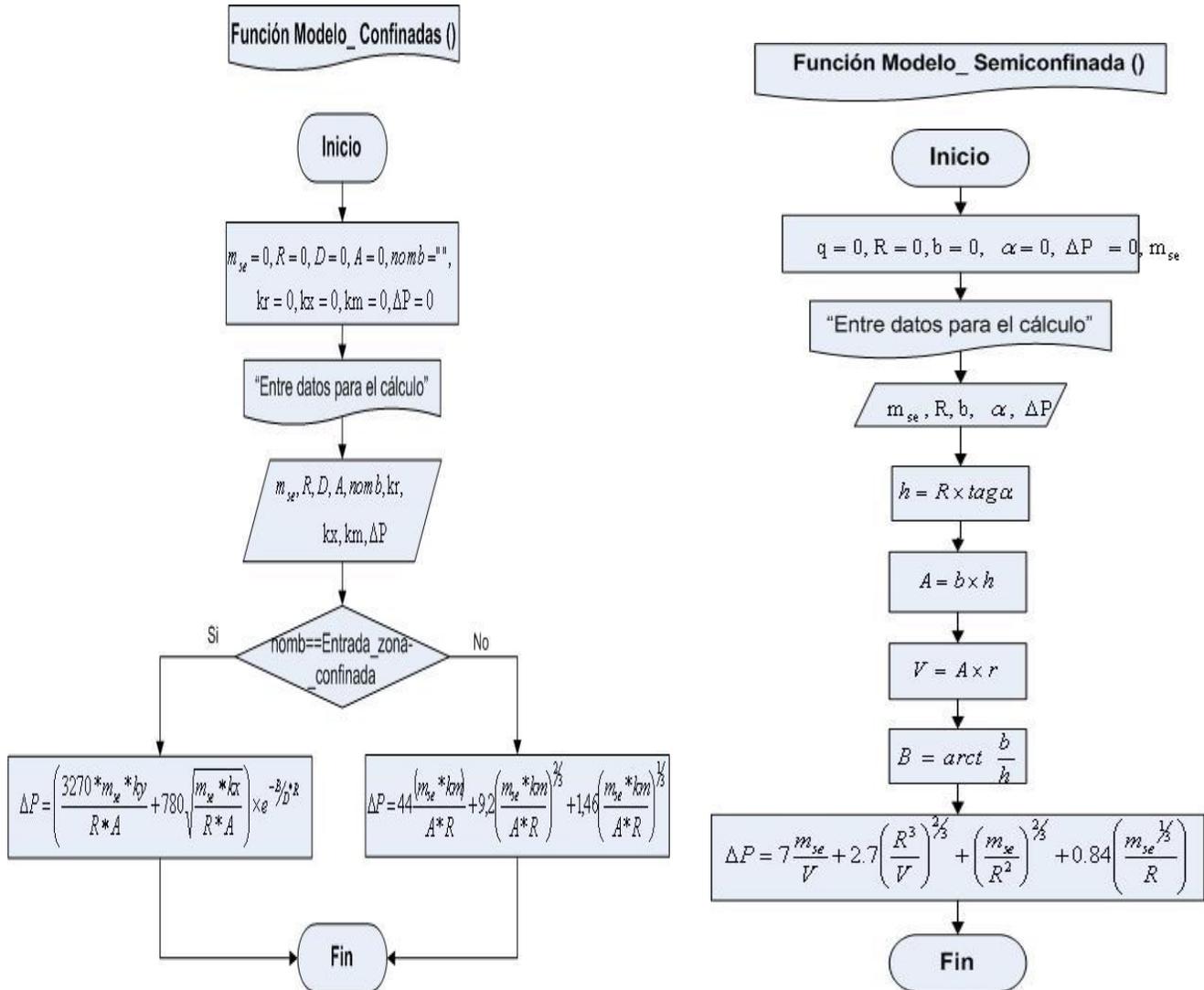


Cálculo de la presión zonas confinadas y no confinadas.

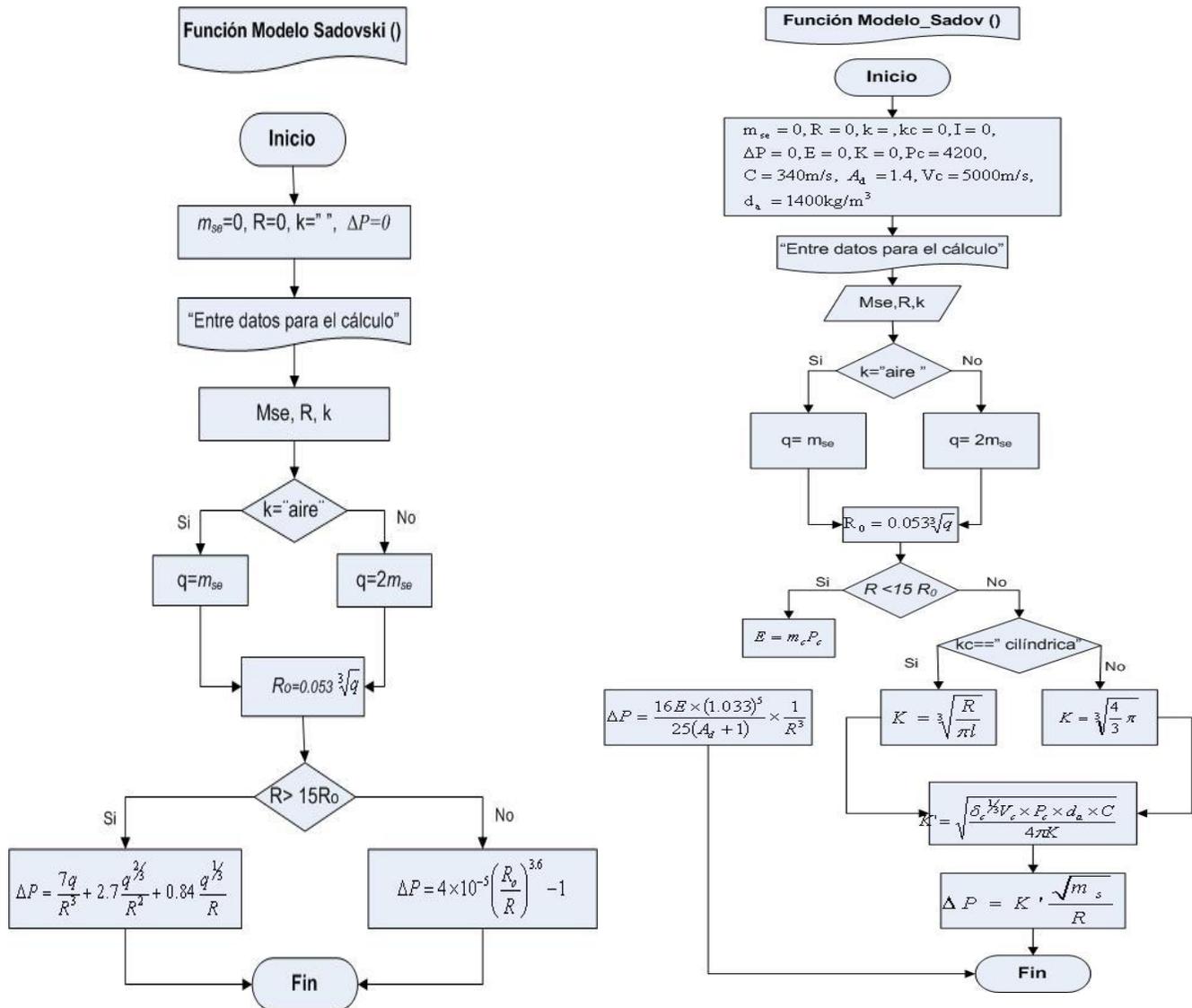


Cálculo de la presión en la zona semiconfinada.

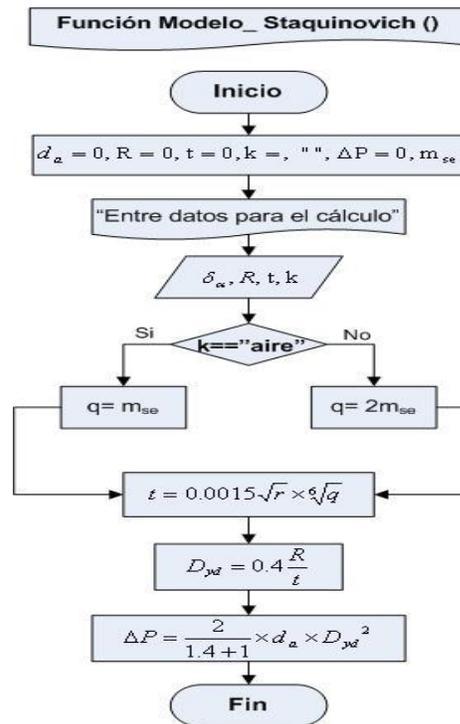
Anexo 2 Algoritmo: Simulación de explosiones aéreas. Funciones auxiliares



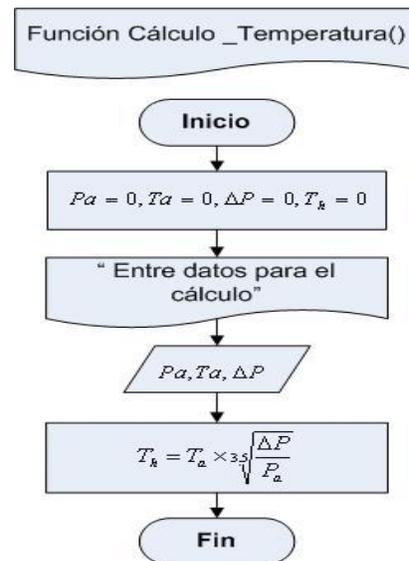
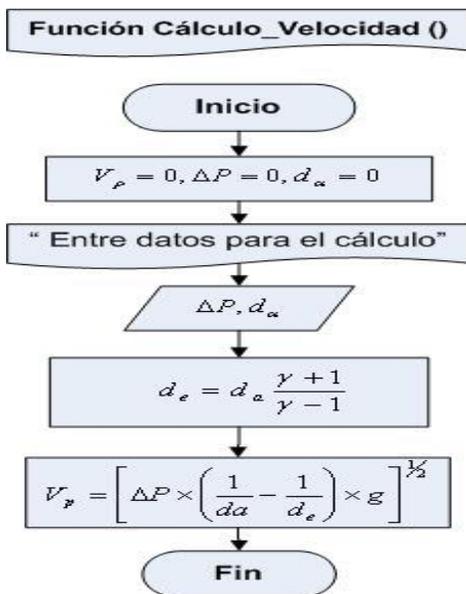
Cálculo de la presión en las zonas semiconfinadas y no confinadas



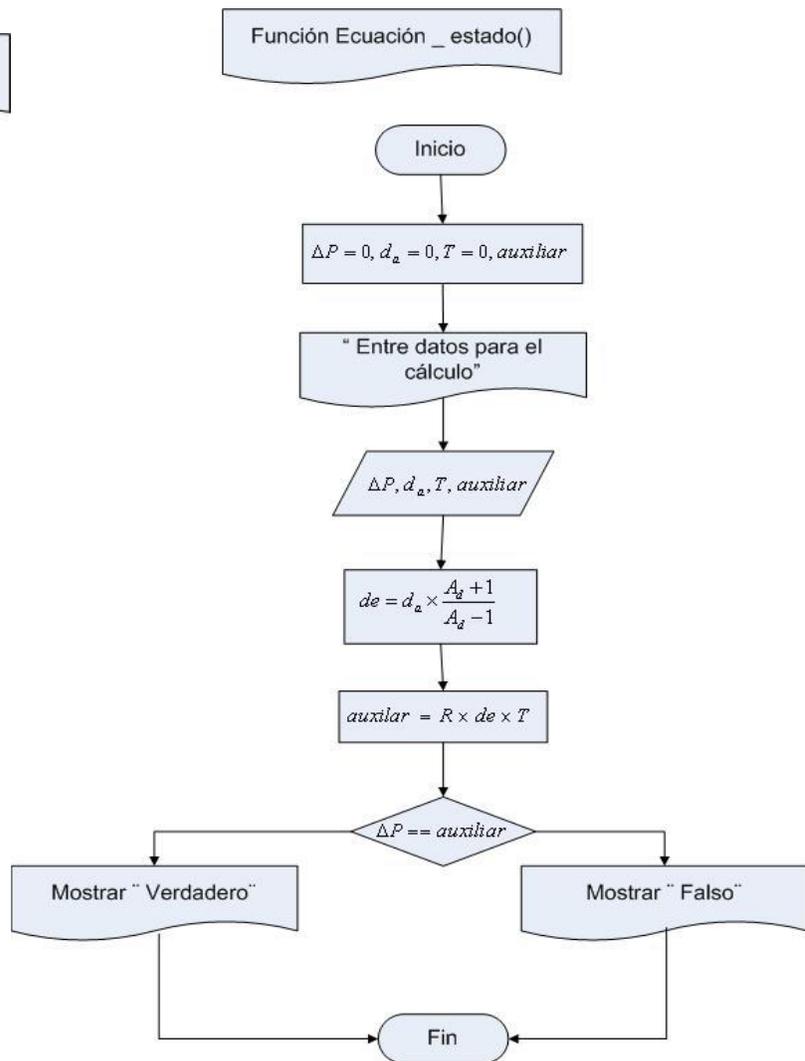
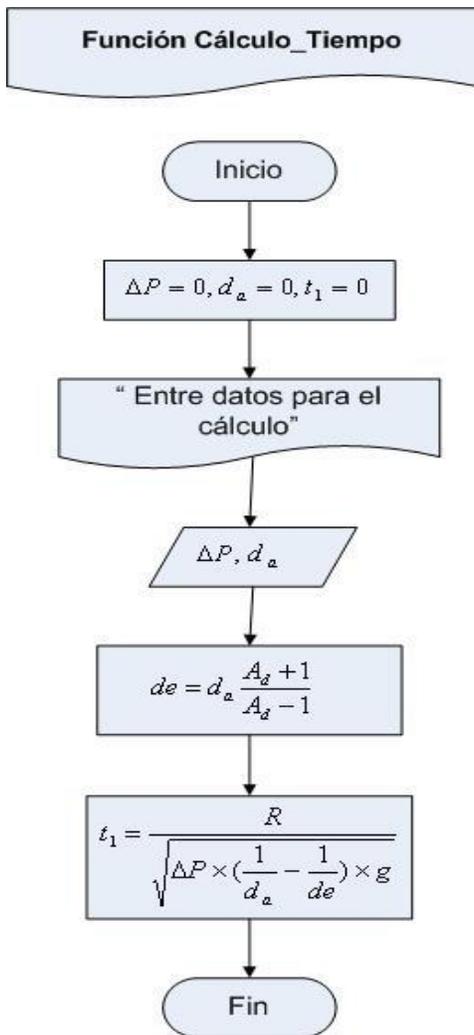
Cálculo de la presión mediante los modelos de Sadovski y Sadov en las zonas no confinadas.



Cálculo de la presión mediante el Modelo de Stakinovich en las zonas no confinadas



Cálculo de la velocidad y el tiempo de propagación en la explosión aérea.



Cálculo del tiempo acción de las explosiones aéreas. Validación de la ecuación de estado de las explosiones aéreas

GLOSARIO

API Win32: conjunto de funciones residentes en bibliotecas que permiten que una aplicación corra bajo el sistema operativo Windows

Concentración volumétrica: se refiere a la cantidad de energía confinada en un volumen determinado, entiéndase cantidad de energía por unidad de volumen.

Confinado: condición de contorno donde se produce la explosión. Se refiere a locales cerrados y pozos.

Comportamiento físico: comportamiento de las magnitudes físicas que caracterizan el fenómeno de las explosiones aéreas, a partir de los conceptos y definiciones que la física aporta para el estudio de ese fenómeno.

Densidad: cantidad de masa por unidad de volumen.

Detonación: proceso de transformación de la energía que contiene un material, generalmente de naturaleza química, que se intercambia a elevadas velocidades con el medio adyacente.

Energía: capacidad para realizar un trabajo, que además debe tener un valor numérico.

Fotogrametría: técnica que estudia las dimensiones y posición de objetos en el espacio a través de las medidas realizadas sobre una o varias fotografías.

Gas real: se tienen en cuenta las colisiones de las moléculas que pueden ser inelásticas, las fuerzas de atracción y repulsión, la energía de colisión puede ser absorbida de muchas formas, su densidad puede ser elevada.

Graficación: permite visualizar gráficamente la información brindada por los parámetros para realizar la simulación.

Instancia: Valores particulares para los datos de entrada, sobre los cuales se puede ejecutar un algoritmo para solucionar un problema.

No confinada: condición de contorno donde se produce la explosión. Se refiere a locales no cerrado, a cielo abierto.

Onda de choque: onda de presión fuerte que produce diferencias de presión extremas.

Presión: fuerza por unidad de área o superficie.

Rendering: crear en forma automática una imagen de acuerdo al modelo tridimensional que existe en el ordenador.

Semiconfinadas: condición de contorno donde se produce la explosión. Se refiere a locales semiabiertos como las paredes.

Unix: es un sistema operativo portable donde varios procesos son ejecutados al mismo tiempo compartiendo uno o más procesadores y cumplen simultáneamente las necesidades de dos o más usuarios que comparten mismos recursos.