

Algunos Conceptos y Definiciones del Modelado y Simulación Computacional de Incendios

Prof. Dr. J. A. Capote; Dr. D. Alvear; Dr. O. Abreu; Ing. Ind. M. Lázaro; Ing. Ind. P. Espina.

Grupo GIDAI – Seguridad contra Incendios – Investigación y Tecnología. UNIVERSIDAD DE CANTABRIA.

RESUMEN

En los últimos años se ha observado un auge notable en el desarrollo y empleo de la Modelación y Simulación Computacional de Incendios (MSCI). No obstante consideramos que éste ha sido tardío con relación a otras esferas del quehacer humano (la cosmonáutica y aeronáutica, la electrónica, las comunicaciones, los procesos industriales y de servicios, por citar algunos). El desarrollo acelerado en esas otras esferas provocó el surgimiento y desarrollo de la Modelación y Simulación Computacional (MSC) en general, como rama científica.

El presente trabajo pretende atemperar o adecuar los logros de la MSCI a los postulados actuales de la MSC, con el propósito de que la primera se nutra de la segunda para robustecer su base metodológica con la consiguiente ganancia en efectividad y eficiencia.

INTRODUCCIÓN

El Modelado y la Simulación Computacional de Incendios (MSCI) ha experimentado un fuerte impulso en los últimos años. Esto ha estado condicionado por la necesidad permanente de minimizar o evitar las nefastas consecuencias de los incendios, el desarrollo de las investigaciones sobre los procesos físico-químicos relacionados con los incendios y sus modelos matemáticos, el avance considerable e ininterrumpido de la potencia computacional que ha posibilitado la solución de modelos cada vez más complejos y el alto nivel eficiencia-costos que ha demostrado la Modelación y Simulación Computacional (MSC).

Los MSCI surgieron fundamentalmente en la década de los años 80 del siglo pasado (muy pocos en los años 70) y se han desarrollado hasta nuestros días de forma continua y ascendente. Un gran impulso al MSCI le imprimieron los adelantos en las investigaciones y técnicas de la Mecánica de Fluidos Computacional (Computacional Fluid Dynamics – CFD).

Por otra parte, los MSC en otras ramas del conocimiento, se vienen efectuando desde los años 40 (por ejemplo, el MSC realizado para la investigación y construcción de las primeras bombas atómicas) pero adquieren auge e inusitado impulso también a partir de los años 80. Ellas han sido empleadas de forma más intensa en unos campos que en otros, cuestión perfectamente lógica, ya que el MSC frecuentemente es el único método de investigación y análisis disponible para fenómenos y procesos que no pueden ser reproducidos o experimentados en la realidad, o que su costo y peligrosidad hacen la experimentación real impracticable, conjuntamente con la connotación de obtener alguna solución plausible.

En las ramas o campos donde, a principios de los años 90, se había alcanzado un desarrollo notable de la MSC, se impuso la necesidad de desarrollar una teoría general de ella. En efecto, hasta ese momento las simulaciones computacionales se habían empleado de forma bastante improvisada e independiente, sin una base metodológica y científica general suficientemente estructurada. Esto trajo como consecuencia un efecto dañino, costoso y limitante de la efectividad de estas técnicas: la casi total ausencia de la interoperabilidad y la reusabilidad de las Modelaciones y Simulaciones Computacionales existentes. La creación y desarrollo de la MSC como rama científica desde esos años contribuyó, no solamente a solucionar el efecto antes mencionado, sino a aumentar la rigurosidad, correspondencia con los objetivos deseados, credibilidad y efectividad de la MSC en general.

ALGUNOS CONCEPTOS BASICOS

En la teoría general del MSC resulta de gran importancia la definición de cual es el sistema que se quiere simular y que es un modelo de dicho sistema. Desde el punto de vista de esta teoría:

El concepto de Sistema cuenta con diferentes definiciones entre las que destacan:

- Colección de componentes organizados para lograr una función o conjunto de funciones [8].
- Conjunto de entidades que de manera cohesionada persiguen un fin específico [6].
- Entidad que mantiene su existencia a través de la interacción de sus partes [2].

De la misma forma, para la definición de **Modelo** se cuenta con diferentes referencias al respecto, entre las que destacan:

- Representación física, matemática o de cualquier otro tipo lógico, de un sistema, entidad, fenómeno o proceso [8]
- Representación de un sistema real que es equivalente a este sistema en todos sus aspectos relevantes [6]
- Representación simplificada de un sistema desde un punto de vista particular en el tiempo y el espacio para proporcionar el entendimiento del sistema real [2]
- Representación de la construcción y el funcionamiento de cierto sistema de interés [12]
- Descripción lógica de cómo un sistema, proceso o componente funciona [7].

Al igual que de sistema, pudiésemos referir muchas más definiciones pero creemos que con estas bastan.

Los modelos pueden ser **físicos**, cuando manifiestan a escala las propiedades físicas del sistema real, **gráficos**, cuando constituyen diagramas gráficos que describen la estructura a alto nivel o el funcionamiento del sistema, o **matemáticos**, cuando son un conjunto de expresiones matemáticas o lógicas que expresan las relaciones entre las entidades del sistema. Desde la óptica de la MSC, consideraremos solo los modelos matemáticos explícitos que puedan ser implementados como programas (software) en una computadora.

Es conveniente señalar que los modelos matemáticos pueden ser resueltos por métodos analíticos o por métodos numéricos. La solución analítica de un modelo matemático consiste en la obtención de una expresión que puede ser calculada para obtener valores exactos de las variables de salida que nos interesen. Hasta la década de los años 70 del siglo pasado y en correspondencia con el aún incipiente desarrollo de la computación se trataba de encontrar a toda costa soluciones analíticas a los modelos matemáticos de interés, aún recurriendo a múltiples simplificaciones u omisiones en ellos. Los métodos numéricos de solución de modelos matemáticos se fundamentan en la discretización y aproximación de los valores numéricos de las variables del modelo, generalmente condicionadas por la discretización de las variables independientes (usualmente el tiempo y/o el espacio). Si bien eran conocidos muchos métodos numéricos hasta la fecha antes citada, su aplicación práctica era muy engorrosa y consumía gran cantidad de tiempo y recursos. El desarrollo impetuoso de las ciencias y técnicas de la computación a partir de los años 80 trajo aparejado el incremento, prevalencia y continuo perfeccionamiento de los métodos numéricos.

Ellos son los que se emplean predominantemente en la MSC ya que permiten alcanzar niveles superiores de exactitud por posibilitar la solución de modelos mucho más complejos (sin simplificaciones u omisiones) y en múltiples ocasiones, son los únicos aplicables, por cuanto gran cantidad de modelos matemáticos no permiten ningún tipo de solución analítica. Esto no significa, ni mucho menos, que se hayan desechado los métodos de solución analítica de modelos: ciertas partes de un modelo matemático complejo pueden ser solucionadas analíticamente para facilitar la solución numérica general. Además frecuentemente se recurre a soluciones analíticas simplificadas para ganar claridad en los fenómenos y procesos modelados o para ayudar en la labor de verificación y validación de éstos.

En ocasiones se encuentra en la literatura la definición de **modelo conceptual**. Muchos autores identifican el modelo conceptual del sistema con su modelo matemático, mientras que otros introducen el término de **modelo comunicativo** para referirse al modelo matemático de un sistema con fines de su simulación, dejando el término de modelo conceptual para su descripción formal en términos semánticos o lógicos (algebraicos o gráficos).

Tiene amplio uso y reconocimiento el término de **modelo computacional** o **modelo de simulación**, entendido como un modelo matemático implementado en una computadora con el fin de realizar (correr) experimentos. El modelo computacional se implementa usualmente como un programa en algún lenguaje de programación específico.

EL MODELADO COMO VEHICULO DEL ANALISIS DEL INCENDIO

El incendio en si mismo es un proceso complejo (fenómeno caótico) de difícil representación. Es prácticamente imposible lograr un modelo matemático y computacional para simular el proceso del incendio con todas sus relevancias y consecuencias, con la debida exactitud que permita su utilidad práctica.

Si admitimos el incendio como el proceso de combustión imprevista e incontrolada de elementos, objetos o sustancias de cualquier naturaleza y al conjunto de fenómenos asociados a éste, como son: la generación y transmisión de energía térmica, la variación de las propiedades de los elementos u objetos involucrados, la generación y propagación de humos y productos de la combustión, podemos asegurar, sin ningún temor a dudas, que tal definición del incendio para su Modelado y Simulación Computacional es incongruente e inoperante.

Todo el conjunto de procesos citados en la definición de incendio anteriormente referida son tan diversos y complejos que su modelado aceptable resultaría impracticable, y su simulación, imposible con los medios actuales. Y ésto es natural en cualquier proceso de simulación computacional: **Se requiere una formulación clara y precisa de los objetivos que se persiguen con la simulación para detectar y definir los aspectos relevantes del sistema que deben ser tomados en cuenta desde el mismo momento de la definición del sistema a simular.**

Por ello, si la definición de incendio dada anteriormente puede servir de base teórica y analítica para las aplicaciones prácticas consecuentes, nunca debe olvidarse la necesidad de concreción de la definición para las aplicaciones prácticas de MSCI.

No pocos autores tratan el problema desde el punto de vista de **sistema real** y **sistema simulado**, siendo este último el reflejo de aquellas propiedades, características y funciones del sistema real que se consideren significativas o relevantes bajo el prisma de los objetivos específicos de la simulación. Por ello podemos llamar, al definido anteriormente, como **incendio real** y, como **incendio simulado**, al subconjunto de características del sistema real que interesen para un fin concreto de simulación.

En el caso particular de la MSCI las alternativas de sistemas simulados pueden ser realmente infinitas. Ellas pueden variar:

- **de acuerdo al escenario del incendio** (en locales cerrados, con aberturas, en espacios abiertos, en configuraciones cerradas complejas, en medios de transporte, en túneles, para distintas cantidades, localizaciones y tipos de combustible, con o sin sistemas de ventilación, etc.).
- **en correspondencia con los objetivos perseguidos de la simulación** (definir las posibilidades de detección precoz, la efectividad de diferentes medios pasivos o activos de protección o extinción, la afectación de humos u otros productos de la combustión, el colapso de edificaciones, la afectación impermisible de materiales, estructuras, etc., las posibilidades de supervivencia, las facilidades de actuación de los equipos externos, etc.).
- **a tenor con las posibilidades reales de modelación y simulación** y las necesidades de prevención.

Por ello definiremos como modelo matemático de incendio desde el punto de vista de la MSCI a:

El conjunto de expresiones matemáticas y/o lógicas que definen las características y comportamiento de un incendio simulado.

FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA SIMULADO DE INCENDIO

Todo sistema simulado de incendio tiene un entorno con el cual interactúa. Esto es válido para cualquier sistema simulado en cualquier campo de acción. La definición precisa de la frontera entre el sistema y su entorno resulta de vital importancia para cualquier simulación. La MSCI no constituye una excepción.

Esto resulta un aspecto realmente difícil para todo colectivo o especialista de simulación. La definición precisa entre sistema simulado y entorno tiene como base el conocimiento profundo de los fenómenos del sistema real y, por tanto del sistema simulado. La frontera generalmente esta dada por la variabilidad temporal y/o espacial y la intensidad relacional.

En el caso de los incendios, la definición de la frontera entre el sistema de incendio simulado y su entorno depende sensiblemente de las características del escenario a simular y de los objetivos concretos o específicos de la simulación. Si los elementos, objetos o sustancias del entorno, para una frontera sistema-entorno previamente establecida, no cambian sustancialmente el funcionamiento del incendio simulado o son comunes para una gran variedad de incendios simulados, puede considerarse que dicha frontera es válida.

En este momento es oportuno referir la aseveración de muchos prestigiosos científicos de la MSC sobre el hecho de que ésta es una rama de la ciencia que como quizás ninguna, empalme con la creación artística. En efecto, toda simulación, aunque sean definidos con precisión sus objetivos, su escenario y su presupuesto, puede ser realizada de múltiples formas, cuyos resultados pueden ser más o menos eficientes en dependencia de las consideraciones, asunciones, atajos, suspicacias, maestría y “arte” del especialista o equipo que la realice. Esto se pone de manifiesto, entre otras cosas en la definición de la frontera entre sistema de incendio simulado y entorno.

No obstante creemos que podemos dar algunas recomendaciones generales. Todo incendio, en última instancia, consiste en un intercambio brusco y *sui generis* de energía, masa y momento (por ello se trata insistentemente de modelar con las ecuaciones de Navier – Stokes).

En dependencia de los objetivos específicos de la simulación puede ser prevalente uno u otro de estos intercambios. La frontera entre sistema simulado de incendio y entorno entonces, debe ser situada donde el factor predominante no varíe sensiblemente (donde la sensibilidad de variación también depende de la naturaleza de los objetivos).

El funcionamiento de todo sistema real o simulado depende de uno o ambos de los factores siguientes:

- el transcurso del tiempo
- la variación del entorno que influya sobre el sistema simulado

A esta aseveración no escapan los MSCI. En ellos influyen fuertemente ambos factores: el transcurso del tiempo determina el comportamiento de la combustión y los procesos energéticos (térmicos y de momento) y máscopicos asociados al sistema simulado que se haya definido así como el intercambio de oxígeno con el entorno y el comportamiento de este en cuanto a fluidos, estabilidad, accesibilidad, etc. Todo ello determina el comportamiento del incendio simulado.

TIPOS DE MODELOS

Todas las anteriores definiciones enunciadas del concepto Modelo son válidas para nuestro propósito. Claro que desde el punto de vista de la MSCI consideraremos solo la modelación matemática de los incendios en aquellos aspectos de interés para la solución de problemas concretos.

Según el enfoque de la teoría general de la MSC, los modelos matemáticos de cualquier sistema pueden ser:

1. Estáticos o dinámicos
2. Continuos o discretos.
3. Determinísticos o aleatorios.

Los modelos estáticos son aquellos invariables en el tiempo y los dinámicos, por el contrario, consideran la variación temporal del estado del sistema modelado.

Los modelos continuos tratan las variables de estado del sistema modelado como continuamente variables en función del tiempo de trabajo o actuación del sistema mientras que los modelos discretos (o modelos de eventos discretos) consideran solo acciones o eventos característicos del sistema simulado para los que no se toma en consideración su evolución, sino solo el momento de su consumación.

Para comprender realmente lo expuesto, debemos brindar algunas definiciones generales de la MSC:

Atributo es una propiedad o valor asociado con una entidad o componente de interés principal del sistema estudiado.

Estado del sistema es el conjunto suficiente de atributos para describir el sistema en cierto momento con respecto al comportamiento de interés.

Variables de estado son el conjunto de atributos cuantitativos que definen el estado del sistema.

Evento es la ocurrencia instantánea que afecta el estado del sistema simulado.

La aplastante mayoría de los sistemas matemáticamente modelados y computacionalmente simulados son dinámicos. En efecto, puede ser estático el modelo de una construcción, pieza, dispositivo u objeto cualquiera (y nos mantenemos hablando de modelos matemáticos) en los que se relacionen sus características o variables de estado principales con otras primarias. No obstante, en la naturaleza y la sociedad predominan los sistemas variables en el tiempo, para cuya descripción se requieren modelos matemáticos que contemplen esta variabilidad. Estos son los modelos dinámicos, a los cuales pertenecen, por supuesto, los **MSCI**, para los que la variabilidad temporal es indiscutible.

La clasificación entre modelos en discretos y continuos no es tan evidente como la anterior. Resulta que, en principio, todo sistema puede ser modelado de forma continua o discreta, según los objetivos que se persigan y la disponibilidad de tiempo, recursos y conocimientos de que se disponga.

En principio si las variables de estado de un sistema cambian continuamente en el tiempo, el modelo matemático que lo describa debe ser continuo. Es evidente la existencia de sistemas intrínsecamente discretos (centrales telefónicas o canales de comunicaciones, cuya variable principal es la cantidad de llamadas o conexiones, sistemas de servicios masivos o fenómenos de colas de diferente tipo, sistemas productivos definidos por piezas, elementos u objetos que solo pueden ser contabilizados de forma discreta, etc.).

No obstante, aún estos sistemas discretos pueden ser tratados de forma matemáticamente continua, al igual que los sistemas que por naturaleza son continuos, pueden ser tratados de forma discreta.

En efecto, se pueden encontrar valores característicos o límites de las variables de estado de un sistema continuo, que signifiquen una alteración notable de la calidad del sistema y, considerar el alcance de esos valores como un evento discreto.

En conclusión, el desarrollo de un tipo de modelo matemático (continuo o discreto) para describir un sistema dado, depende sensiblemente del objetivo que se persiga, de la disponibilidad de elementos matemáticos y computacionales para su representación, de los factores de tiempo y recursos destinados a la solución de la tarea, de la calificación y experiencia del personal que asuma la misión de modelación, etc.

En el caso de los **MSCI** han predominado los modelos continuos. No redundaremos en el presente trabajo sobre su clasificación en **modelos de zona o de campo**, bien definidos y explicados en diferentes referencias [3, 4, 5].

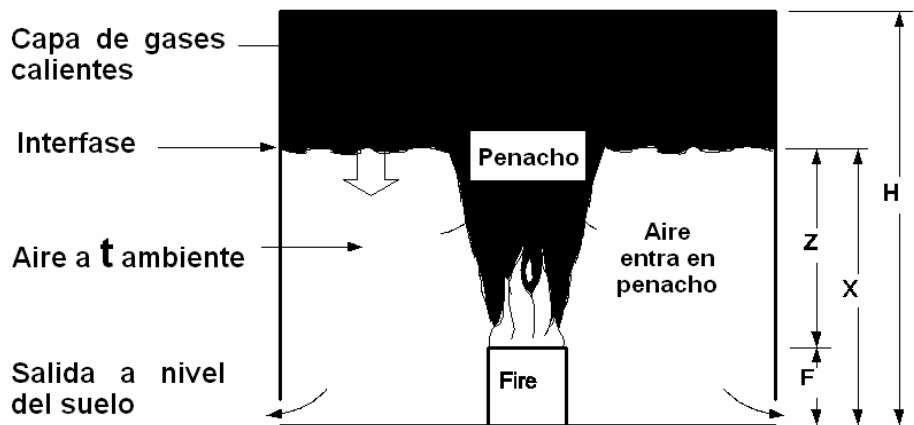


Fig. 1. Representación de las dos zonas del incendio según los Modelos de Zona. (Fuente: Archivo GIDAI)

Sin embargo, es harto conocido que en un incendio hay múltiples puntos críticos (tanto de colapso de estructuras aisladas de construcciones, objetos o elementos de los escenarios concretos del incendio, como de situaciones térmicas como el *flash-over* o niveles de humo impermisibles, que pueden ser tratados también mediante una determinada discretización espacial y/o temporal).

Smokeview 4.0.5 - Feb 14 2005

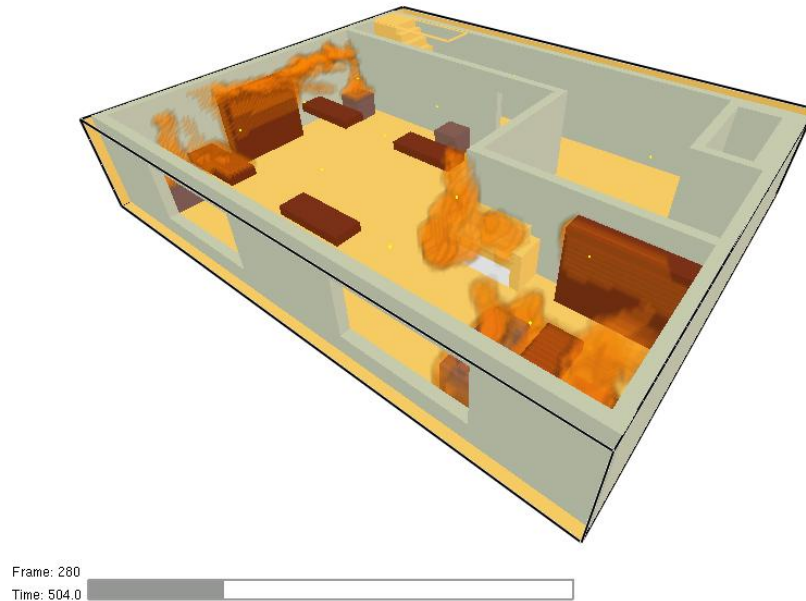


Fig. 2. Simulación Computacional del crecimiento del Incendio con un Modelo de Campo.
(Fuente: Archivo GIDAI)

Puede plantearse la pregunta de que ventaja tiene un enfoque sobre otro. Esta es una pregunta de difícil respuesta. Generalmente los modelos discretos son más fáciles de formular y computarizar que los continuos. En los modelos continuos frecuentemente debe recurrirse a métodos numéricos de solución ocasionalmente complejos y que influyen con su exactitud en los resultados de la simulación, mientras que los modelos discretos pueden mayoritariamente ser representados por relaciones lógicas y la aplicación de algunos métodos de investigación de operaciones y optimización de sistemas.

Los modelos discretos además permiten de una forma más simple considerar los factores aleatorios que influyen en el funcionamiento del sistema, ya que cuando los modelos continuos son complejos, como en el caso de los modelos de campo para la simulación de incendios, las características propiamente engorrosas de solución numérica de ellos prácticamente imposibilitan o dificultan notablemente la consideración de los factores aleatorios actuantes, sean estos sucesos, variables o funciones.

Por último, debe considerarse la existencia de modelos híbridos, en los que determinados sub-sistemas del sistema analizado se describen mediante modelos continuos y otros mediante modelos discretos. En este caso lo más usualmente empleado es la aplicación de un modelo discreto para el sistema en su conjunto con la aplicación de modelos continuos a determinadas partes del sistema.

Ya formulada la consideración de la aleatoriedad en los modelos resulta evidente la clasificación brindada de modelos determinísticos y estocásticos: los primeros no consideran los factores aleatorios del sistema en el modelo y, para un conjunto dado de datos de entrada los resultados de la solución del modelo siempre es la misma. Por el contrario, los modelos estocásticos toman en consideración estos factores aleatorios. Ello requiere la aplicación de los métodos de la teoría de probabilidades, la estadística matemática y los métodos de Monte Carlo para la conformación y simulación de estos modelos.

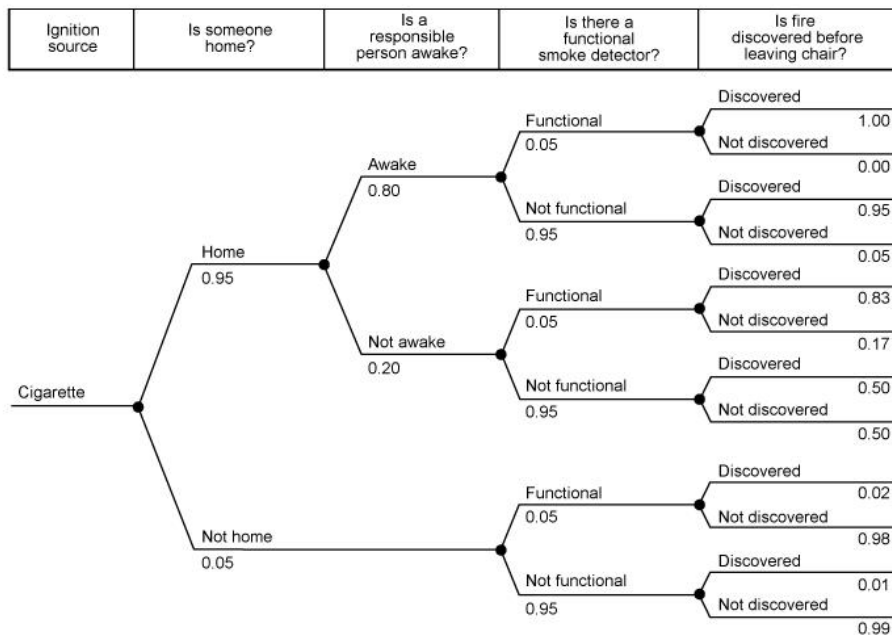


Fig. 3. Arbol de eventos de un Modelo Probabilístico de Incendios (Fuente: Fire Protection Handbook NFPA)

En comparación con el empleo de modelos deterministas, todavía resulta insuficiente el desarrollo de modelos estocásticos de los MSCI [15], aunque pueden resultar de gran importancia debido al carácter eminentemente aleatorio de casi todos los fenómenos intrínsecos o relacionados con un incendio.

SIMULACIONES DE INCENDIOS

Ante todo creemos oportuno brindar algunas definiciones (aunque hasta el momento hayamos empleado el término intuitivamente) de qué es simulación computacional, para sobre esa base, definir que denominaremos simulaciones computacionales de incendios.

La simulación computacional es una representación dinámica de un modelo que frecuentemente involucra cierta combinación de código de ejecución, hardware de interfaz para el control y representación de resultados e interfaces con equipos, mecanismos y/o personas del mundo real [8].

La simulación computacional es la tarea de realizar experimentos en una computadora con un modelo matemático usando técnicas numéricas para imitar el funcionamiento de un sistema en un intervalo de tiempo [13].

La simulación computacional es la disciplina del diseño de un modelo actual o teórico de un sistema físico, la ejecución de este modelo en una computadora digital y el análisis de los resultados de esta ejecución [9].

De acuerdo a las definiciones referidas, de las cuales solo hemos brindado una muestra, podemos formular una Simulación Computacional de Incendio como:

La implementación del modelo matemático de un incendio simulado en una computadora digital mediante el modelo computacional correspondiente, su ejecución reiterada y el análisis de los resultados de estas ejecuciones.

Como se observa hemos destacado la reiteración de la ejecución del modelo computacional durante la simulación computacional de incendios ya que lo común en estos casos, aún siendo los modelos determinísticos, es la ejecución reiterativa variando en ciertos límites los parámetros de entrada (incluyendo los del entorno) para el análisis de los resultados en correspondencia con los objetivos específicos de la simulación.

La simulación computacional de incendios puede ser empleada:

1. Como **herramienta de análisis**:

- para predecir las consecuencias, de un incendio en un escenario concreto y existente, o
- para evaluar las causas, evolución, actuaciones o consecuencias de un incendio ocurrido en un escenario real.

Esta forma de empleo permite definir como interactúan las variables de estado de un incendio, cuales son realmente importantes en la evolución de éste, etc.

2. Como **herramienta de diseño**:

- Para estudiar la efectividad de cierto grupo elegido de medidas encaminadas a evitar un incendio o minimizar sus consecuencias en un escenario proyectado pero físicamente inexistente total o parcialmente.

En este caso la simulación de incendios permite dar respuesta a las interrogantes de tipo “¿**qué sucedería si...**? Relacionadas con la seguridad y los costos de las medidas de prevención, extinción y salvamento en escenarios proyectados, totalmente nuevos o existentes que se pretendan modificar.

Por último quisiéramos referirnos a las ventajas y desventajas que, a nuestro juicio, se le pueden señalar a los **MSCI**.

Ventajas:

- Un modelo y simulación computacional de incendios puede emplearse repetidamente para analizar los factores deseados y los diseños o políticas propuestas o empleadas.
- La simulación computacional de incendios es mucho más económica y segura que la experimentación física de ellos a escala real o reducida.

- En múltiples ocasiones el **MSCI** es la única vía factible de análisis o diseño de estos sistemas.
- Los modelos de simulación de incendios son generalmente de más fácil aplicación que los métodos analíticos de solución, pueden prescindir de las asunciones restrictivas de éstos últimos, permiten controlar la exactitud de solución y obtener, prácticamente, cualquier variable de estado prevista.

Desventajas:

- La construcción y empleo exitosos de modelos y simulaciones computacionales de incendios, como para cualquier tipo de MSC, no es una ciencia exacta y se plantea que tiene muchos elementos de arte. Esto obliga al personal que la realiza a disponer de suficientes conocimientos científico-técnicos, habilidades y experiencia, adquiribles sólo a costa de tiempo y continuado esfuerzo. El desarrollo y uso de simulaciones de incendios sin los conocimientos y experiencia debidos y la toma de decisiones basadas en ellos puede resultar catastrófico.
- Los resultados de una simulación de incendios pueden ser difíciles de interpretar.
- El desarrollo y empleo de las simulaciones de incendios pueden requerir considerables gastos de tiempo y resultar costosos.

Es significativo el hecho que las desventajas citadas pueden ser minimizadas con el estudio y experiencia del personal que desarrolle o aplique la MSCI.

CONCLUSIONES

El conjunto de conceptos y definiciones de la MSCI brindados no pretende ser absoluto ni inalterable. Es sólo una primera aproximación que aspira, como se expuso inicialmente, a un acercamiento del conjunto de conocimientos y aplicaciones de MSCI alcanzado hasta la fecha, con el conjunto análogo de la MSC como rama científica general.

Consideramos que ello debe contribuir al fortalecimiento científico – metodológico de la MSCI y, correspondientemente, al incremento de su eficiencia y efectividad.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Banks, Jerry, Carson II, John S., and Nelson, Barry L. “Discrete Event System Simulation”. Second Edition, Prentice Hall, 1996.
- 2.- Bellinger, Gene. “Modeling & Simulation”. Outsights Corp., 1997.
- 3.- Walton, William D., Budnick, Edward. “Deterministic Computer Fire Models”. Section 11 Chapter 5 Fire Protection Handbook Eighteenyh Edition. National Fire Protection Association, 2002.
- 4.- Quintiere, James G. “Compartment Fire Modeling”. Section 3 Chapter 5 The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Third Edition. Society of Fire Protections Engineers, 2002
- 5.- Capote Abreu, Jorge A., Alvear Portilla, Daniel., Herrera del Campo, Guillermo, et.al. “Limitaciones de la Simulación Computacional en la Protección contra Incendios en la Edificación”. GIDAI, Universidad de Cantabria, 2003.
- 6.- Cunningham, Conrad H. “Lecture Notes of CSci405: Computer Simulation”. Department of Computer and Information Science, University of Mississippi, 2000.
- 7.- Diamond, Bob. “Concepts of Modeling and Simulation”, Imagine That Inc., 1997.
- 8.- DoD Glossary of M&S Terms. (DoD 5000.59-M). December 1997.
- 9.- Fishwick, Paul A. “Simulation Model Design and Execution: Building Digital Worlds”. Prentice Hall, 1995.
- 10.- Garrido, José M. “Practical Process Simulation: Using Object – Oriented Techniques and C++”, Artech House, 1999.
- 11.- Law, Averill M. and Kelton, David W. “Simulation Modeling and Analysis”, Second Edition, McGraw Hill, 1991.
- 12.- Maria, Anu. “Introduccion to Modeling and Simulation”. State University of New York at Binghamton. Proceeding of the 1997 Winter Simulation Conference.
- 13.- Starfield, Anthony M., Smith, Karl A., and Bleloch, Andrew L. “How to Model It: Problem Solving for the Computer Age”. McGraw Hill, 1990.
- 14.- Zeigler, Bernard P. “Theory of Modeling and Simulation”, John Wiley and Sons, 1976.
- 15.- Watts, John M. Jr.. “Probabilistic Fire Models”, Section 11 Chapter 6 Fire Protection Handbook Eighteenyh Edition. National Fire Protection Association, 2002.

Autores:

D. Jorge A. Capote Abreu, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos - Prof. Titular y Director del Grupo GIDAI, Departamento de Transportes y T.P.P., Universidad de Cantabria.

D. Daniel Alvear Portilla, Ingeniero Industrial - Coordinador de la Línea de Investigación del Grupo GIDAI, Doctorando del Departamento de Transportes y T.P.P., Universidad de Cantabria.

D. Orlando V. Abreu, Dr. en Ciencias Técnicas – Consulting Adviser. Colaborador externo Grupo GIDAI.

D. Mariano Lázaro Urrutia, Ingeniero Industrial - Doctorando del Departamento de Transportes y T.P.P., Universidad de Cantabria.

D. Pablo Espina Santos, Ingeniero Industrial - Doctorando del Departamento de Transportes y T.P.P., Universidad de Cantabria.

GIDAI- Grupo de Investigación y Desarrollo
Seguridad contra Incendios – Investigación y Tecnología.
Dpto. de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Santander, Marzo 2006