

Simulación de Altas Prestaciones en Modelos Dinámicos basados en Agentes para la Evacuación de Edificios ¹

Antonio González Cuevas, Remo Suppi, Dolores Rexachs y Emilio Luque

Departamento de Arquitectura de Computadoras y Sistemas Operativos, Universitat Autònoma de Barcelona, Escuela de Ingeniería, Bellaterra (08193), Barcelona, España.
agonzalez@serissa-systems.com {Remo.Suppi, Dolores.Rexachs, Emilio.Luque}@uab.cat

Abstract.

Uno de los grandes problemas en la evacuación de edificios es que los protocolos y normas se definen en base a la lógica, la experiencia y las pruebas/simulacros y que la mayoría de las veces no aportan información fidedigna ya que las condiciones no son las mismas que cuando se produce la emergencia real. Es por ello que los expertos en este tipo de situaciones buscan métodos que les permita evaluar escenarios y situaciones con diferentes reglas-protocolos-configuraciones para determinar lo que la experiencia o los simulacros no hacen: la forma de salvar vidas bajo diferentes condiciones. La simulación permite hacer este tipo de evaluaciones ya que con la utilización de herramientas de altas prestaciones y cómputo distribuido se pueden evaluar modelos complejos. Estas técnicas permitan encontrar las reglas óptimas ejecutando diferentes configuraciones un gran número de veces y obtener resultados estadísticos de comportamiento de los individuos en diferentes situaciones. En este artículo se presenta un sistema de modelado dinámico basado en agentes para la evacuación de emergencia en edificios utilizando el cómputo de altas prestaciones (HPC) como herramienta para resolver estos problemas.

Keywords: Modelos basados en agentes, simulación, evacuación de emergencia, evacuación de edificios, HPC.

1 Introducción

Existen una gran cantidad de situaciones de riesgo que pueden ocurrir en edificios como pueden ser incendios, fugas de gas, terremotos, inundaciones, acciones terroristas antes las cuales los ocupantes pueden intentar salir en forma desorganizada y presa del pánico. El sistema de evacuación, formado por reglas y protocolos de seguridad, deben permitir que los individuos puedan salir en el menor tiempo posible y preservando su integridad física.

Es por ello que la evacuación de los individuos es uno de los conceptos fundamentales en la seguridad de edificios y es un área de trabajo multidisciplinar

¹ Este trabajo ha sido subvencionado por el MICINN-Spain bajo el contrato TIN2007-64974

donde los constructores, empresas de ingeniería y administración deben trabajar conjuntamente para determinar los protocolos y equipamiento que permitan salvar vidas en estas situaciones.

No obstante existen condicionantes que dependen del propio individuo como son la actitud que tome en ese momento de la emergencia, el conocimiento de la situación y del entorno, la edad y su acción en relación a otros individuos en el entorno. Esto genera una gran cantidad de preguntas cuando se define el plan de evacuación ya que por ejemplo un individuo sereno puede mirar las señales y dirigirse hacia las salidas en una situación de calma pero quién garantiza que este individuo pueda leerlas y seguirlas en una situación de pánico. Uno de los primeros problemas a resolver es cuál es el mínimo tiempo de ejecución de una plan de evacuación? Si se considera que todos los individuos se dirigen a sus salidas de emergencia y uniformemente distribuidos por ellas se tendría un tiempo que es el mínimo posible pero en una situación de pánico es muy probable que los individuos se agolpen en una salida haciendo caso omiso a las indicaciones de distribuirse en las diferentes salidas.

Es por ello que se necesitan técnicas que permitan valorar cuantitativamente diferentes situaciones y configuraciones, diferentes reglas y protocolos y también poder configurar diferentes escenarios con individuos con y sin conocimiento del entorno y de diferentes edades o tipo de reacción y actitud. La simulación basada en agentes se presenta como una solución para una gran parte de estos problemas pero el inconveniente está en que son necesarios grandes tiempos de simulación para obtener información útil sobre determinados conceptos (por ejemplo mejora el tiempo de evacuación si el 30% de los individuos se comunica con otros para indicarles donde están las salidas). En este sentido la simulación de altas prestaciones (utilizando clústeres de ordenadores) permite lograr estos objetivos reduciendo sensiblemente el tiempo de obtención de información y de conclusiones significativas en relación a un entorno o al comportamiento (medio) de los individuos en situaciones de emergencia. En el presente artículo se describe el desarrollo y utilización de modelo dinámico de evacuación de edificios basado en agentes utilizando sistemas *multicores*. La sección 2 presenta el estado del arte sobre evacuaciones de edificios y en la sección 3 el modelo desarrollado. La sección 4 se muestra el entorno de simulación utilizado y los experimentos realizados y finalmente la sección 5 y 6 las conclusiones, líneas abiertas y bibliografía respectivamente. [1-6]

2 Estado del arte

Varios tipos de evacuación de emergencia han sido ampliamente estudiados sobre todo después del conocido ataque “9,11” en Estados Unidos, como por ejemplo en la evacuación de los edificios [8], la evacuación de la aviones [9], la evacuación de estaciones [10], o evacuaciones de incendios [11]. La forma más utilizada de minimizar las consecuencias de riesgo y la estrategia de evacuación óptima han sido a través de resultados obtenidos por simulación.

La mayoría de los modelos de simulación para la evacuación de emergencia de se basan en la dinámica de flujo, autómatas celulares, y sistemas multi-agente. Los modelos basados en flujos son fáciles de construir pero les falta la interacción social entre los evacuados, el comportamiento humano y la representación de los riesgos

[2,4,11]. Los autómatas celulares (CA) [11] son un tipo especial de sistema multi-agente (MAS) [12, 13] con agentes muy primitivos (similar a la máquinas de estados finitos) dispuestas en una cuadrícula rígida, y que interactúan entre sí por reglas muy simples. Los modelos MAS son especialmente adecuados para el modelado de la conducta humana, ya que permiten abordar diferentes conductas para los diferentes agentes que se interrelacionan y es por ello que simulación basado en este tipo de modelos se ha convertido en un campo clave de la investigación [14,15,16,17], con interesantes resultados como se muestran en [13,18,19].

3 El modelo

Como punto de partida se considera que durante una evacuación de emergencia existen diferentes aspectos de análisis: el entorno y la información (puertas y señales); las políticas y procedimientos de la evacuación, y las características sociales de los individuos que afectan a la respuesta durante la evacuación. Como se ha mencionado para los dos primeros aspectos existen muchas propuestas pero no con la inclusión de aspectos relacionales. Es por ello que el presente modelo incluye una primera fase de relación entre los individuos y cambio de información entre cada par individuo dispuestos a hacerlo. Como definición general el modelo contemplará las siguientes hipótesis derivadas de [19] como punto inicial para definir el modelo:

1. En situaciones de evacuación de emergencia las personas están generalmente nerviosas o presa del pánico, de modo que tienden a desarrollar acciones irracionales.
2. Los individuos tratan de avanzar lo más rápido posible (más que lo normal).
3. Pueden haber problemas para visualizar las señales (humo, intoxicación, dificultades para respirar) y tener problemas para encontrar las salidas.
4. Los individuos se preocupan de conseguir su objetivo y pueden intentar empujar a los demás en su ansia por salir por una determinada salida recibiendo los otros individuos presiones físicas.
5. Durante la evacuación y a causa de la hipótesis 4 algunos individuos pueden caer y ellos mismo se transformarán en obstáculos para los restantes.

El objetivo del presente trabajo es que el modelo a desarrollar pueda incluir información sobre cuestiones como la comunicación entre individuo, edades, información sobre el pánico, intereses personales o egoístas, psicología social entre otros y que permita estudiar de forma cuantitativa un conjunto de opciones o escenarios que en otros modelos son ignorados. Se debe tener en cuenta que la mayoría de los factores comentados son muy complejos de modelar ya que son fruto del miedo intenso y es por ello que se propone un modelo evolutivo que permita ir incluyendo diferentes factores y realizar simulaciones cuantitativas por escenarios.

En la primera fase, el modelo desarrollado plantea la gestión de la evacuación de los ocupantes de un área cerrada que presentará una cierta estructura de construcción (paredes, accesos...), obstáculos, con una determinada señalización, las correspondientes zonas seguras/salidas y, como cabe de esperar, a los ocupantes que deberán ser evacuados o llevados a las zonas seguras con un mínimo de las características antes mencionadas. El modelo se ha planteado para que sus elementos

sean íntegramente representados como agentes utilizando, algunos de ellos, para generar una red estática de nodos para gestionar y dirigir a los agentes que representan a los ocupantes hacia las zonas seguras/salidas. En cuanto a los individuos el modelo los considera de diferentes edades (sin diferencias de género) y el modelo en su conjunto tiene en cuenta los siguientes atributos:

1. El número total de personas en el área
2. El número de salidas
3. El número de señales encadenadas (consideradas objetivos parciales), su secuenciación y las zonas seguras
4. La velocidad de cada individuo
5. La predisposición a hablar/escuchar y intercambiar su información

El entorno, que simboliza el espacio y que representará la estructura del edificio, se basa en una matriz de nodos en la que cada nodo es representado por un agente. Todos los agentes contenidos en el entorno son agentes pasivos, cuya configuración nos permitirá representar las paredes, los accesos, los obstáculos y demás elementos que puedan representar la estructura del edificio. Los parámetros que contendrán cada uno de estos agentes responderán a la tupla: salida, señal, indicador de posición y lista de posiciones.

La propiedad identificada como salida nos indicará que el agente en cuestión está representando una zona segura o una salida del modelo que podrán utilizar los ocupantes del modelo. El segundo parámetro, la que representa la señal, será un agente que tendrá la función de señalización dentro del modelo. Estas dos propiedades anteriores (las salidas y las señales) y como se verá más adelante, se utilizan para generar una red de nodos que marcarán los caminos que deberán seguir los ocupantes del modelo hacia las zonas seguras o las salidas.

La figura 1 muestra un esquema del entorno (paredes en azul y puertas donde no hay marcas), las señales (marcas amarillas), su secuenciación (flechas), las zonas seguras (marcas verdes), los individuos (marcas blancas).

El modelo desarrollado considera que los ocupantes, o personas a evacuar, son considerados individuos que en principio actuarán de manera racional y seguirán un conjunto de reglas y características que permitan tener una respuesta cercana a la realidad del individuo en un situación similar. Las propiedades definidas para los ocupantes son: tiempo de reacción, predisposición a hablar, edad, destino, índice de posición y último movimiento.

1. El **tiempo de reacción** es el intervalo de tiempo antes de que el ocupante comience el proceso de evacuación. Esta propiedad se utiliza para representar los retardos que puedan ocurrir antes de que los individuos comiencen el proceso de evacuación y que corresponden a otras acciones como avisar a los servicios de emergencias, poca credibilidad respecto a la importancia de la emergencia, intentar actuar en contra de algún foco de la emergencia (por ejemplo, en el caso de un incendio), etc.
2. La **predisposición a hablar** es el factor que actuará como determinante, conjuntamente con el que posea el otro interlocutor, ya que cuando se encuentren dos agentes este parámetro modelará la posibilidad de transmitir información entre los dos individuos y que en este diálogo los dos continúen por el mismo camino (en función de la información intercambiada) o cada uno por su camino.

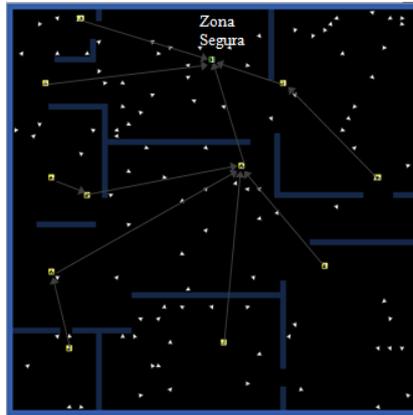


Figura 1. Entorno gráfico de simulación

3. La **edad** es un factor determinante en lo que respecta a la **velocidad** de desplazamiento. En este caso se ha seguido la experimentación realizada por Peschel (1957) y ampliado por Fujiyama para incluir escaleras (2010) [7] que establece las velocidades de desplazamiento en función de la edad de los ocupantes pudiendo ver estos resultados en la siguiente tabla.

| Edad (años) | Velocidad media (m/s) |
|---------------|-------------------------|
| 6 – 10 | 1.1 |
| 13 – 19 | 1.8 |
| < 40 | 1.7 |
| > 40 y < 50 | 1.6 |
| > 50 | 1.5 |

Tabla 1. Relación entre la edad y la velocidad.

En el modelo, el rango de edades establecido varía de los 20 años a los 80 y función de la edad que tenga asignada cada individuo modificará la velocidad de desplazamiento y afectará al tiempo de evacuación del sistema.

4. El parámetro **destino** corresponde al objetivo que tiene el ocupante dentro del entorno. Sus valores pueden ser:
- **Ninguno:** el individuo en cuestión, al no tener conocimiento del entorno, se mueve en forma aleatoria buscando un objetivo marcado en el entorno (señal o zona segura/salida) o bien esperando encontrar a alguien (líder) que se lo haga saber.
 - **Señal:** se dirige hacia un nodo señal esperando, una vez lo encuentre, tener el siguiente objetivo al que dirigirse.
 - **Zona segura/salida:** el ocupante se dirige directamente hacia su objetivo final, encontrar la zona segura o salida donde finalizará su actividad en el entorno.

5. El elemento **índice de posición** permitirá modelar cuando un individuo puede hablar con otro individuo e intercambiar información si es posible.
6. La variable **último movimiento** se utiliza para solucionar las situaciones consideradas “frustrantes” en las que los agentes se encuentran sin posibilidad de movimiento por estar rodeados por otros agentes. Esta variable permitirá realizar la gestión de tal manera que podremos hacer que dos agentes realicen un intercambio de posiciones y así no bloquear los movimientos de los mismos.

En la presente versión del modelo, la interacción que pueden realizar los ocupantes con el entorno será la de reaccionar frente a obstáculos y detectar la presencia de señales y salidas actuando en consecuencia ante las mismas. Si no se ha configurado previamente, los ocupantes viajarán inicialmente sin destino ya que se supone no tienen conocimiento alguno sobre el entorno en el que se están moviendo. Una vez detecten una señal o, la propia zona segura o salida aprenderán, actuarán y responderán conforme al nuevo objetivo marcado.

En relación a la interacción entre ocupantes, los agentes tienen la opción de comunicarse entre ellos en base a unas probabilidades marcadas en función de la predisposición a comunicarse. Esta comunicación se basará en el traspaso de información referente a si el que responde la pregunta tiene información más importante de la que tiene el ocupante, es decir, si el que pregunta se encuentra actualmente sin rumbo y el otro interlocutor tiene información de una señal a la que él mismo se dirija o, si sabe directamente donde se encuentra la salida, el ocupante sin información adoptará este nuevo destino como objetivo. De la misma manera, si el que pregunta se dirige a una señal pero encuentra a alguien que le informa donde hay una salida también cambiará su rumbo hacia el nuevo destino ya que el objetivo final que persigue será el llegar a una zona segura o salida.

La validación funcional de modelo desarrollado se ha realizado tomando como referencia el artículo “Multi agent simulation of pedestrian behavior in closed spatial environments” de Francesca Camillen, Salvatore Capri, Cesare Garofalo, Matteo Ignaccolo, Giuseppe Inturri, Alessandro Pluchino, Andrea Rapisarda y Salvatore Tudisco [7] donde se realiza un análisis de la evacuación de emergencias del Museo del Castillo de Ursino.

4 El entorno experimental

Los experimentos de simulación han sido realizados sobre el entorno mostrado en la figura 2a para 1000 y 1500 individuos. La configuración inicial puede observarse en la figura 2b donde, como se explicó anteriormente, las líneas de color azul representan las paredes, los cuadrados amarillos son las señales de evacuación y las verdes son el punto de encuentro o seguro. Los valores reflejados sobre los arcos de unión entre señales y salidas reflejados en la Figura 2b representan la distancia de Manhattan entre los puntos de unión de los arcos.

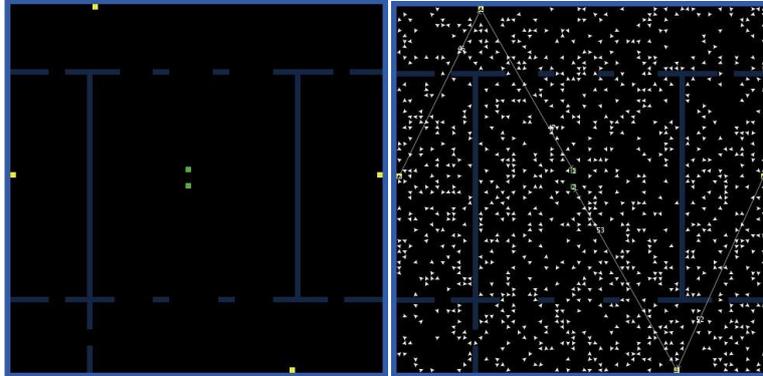


Figura 2. Entorno y configuración inicial para 1000 ocupantes.

Dada la variabilidad de cada individuo y haciendo un análisis de estabilidad de las variables analizadas se considera un intervalo de confianza del 95% teniendo en cuenta el Teorema de Tchebycheff (para $\alpha=0,05$ y $m=6$) se deberá realizar al menos 720 simulaciones obtener unos valores medios adecuados y así, sobre los datos obtenidos, obtener las conclusiones sobre las simulaciones realizadas.

El entorno experimental se ha ejecutado sobre NetLogo ejecutándose sobre un equipo con procesador I5 quadcore de 64 bits y con Debian Squeeze (kernel 2.6.32-5). La figura 3 muestra los tiempos de simulación (las 15 primeras ejecuciones sobre un *core*) para una configuración del entorno que favorezca la comunicación entre agentes y con todos los individuos sin tener conocimiento del entorno. Además se ha configurado una probabilidad de comunicación entre individuos que variará aleatoriamente para cada uno de ellos entre un mínimo de 25 y un máximo de 35 con un valor umbral de de 55, con la máxima velocidad de desplazamiento (20 años) y un tiempo de reacción de 0. Sobre los tiempos obtenidos en un *core*, para las simulaciones de 1000 individuos se obtienen valores medios de simulación de 23,1 segundos con una desviación estándar de 6,5 y un intervalo de confianza de $\pm 3,2$ mientras que para las simulaciones de 1500 ocupantes la media sube hasta 36seg con un desviación estándar de 7,1 y un intervalo de confianza de $\pm 3,5$). Teniendo en cuenta que las pruebas se han realizado solamente en un *core* del procesador las pruebas para obtener las 720 simulaciones tardarán en media 4,62 horas para 1000 individuos y 7,2 horas para 1500 individuos y teniendo en cuenta solo un escenario y un juego de condiciones.

La figura 4 muestra los tiempos de simulación (en 15 ejecuciones diferentes), con la misma configuración definida en el apartado anterior excepto que para esta situación se ha anulado la comunicación entre ocupantes. En este caso, los tiempos obtenidos para 1000 ocupantes tienen un valor medio de 480 segundos y para 1500 ocupantes tenemos un valor medio de 1579 segundos. Si se hace un cálculo directo para ejecutar las 720 simulaciones se obtendría 4 días para 1000 individuos y 13,1 días para 1500 individuos. En líneas de puntos se indica la tendencia lineal de cada conjunto de datos.

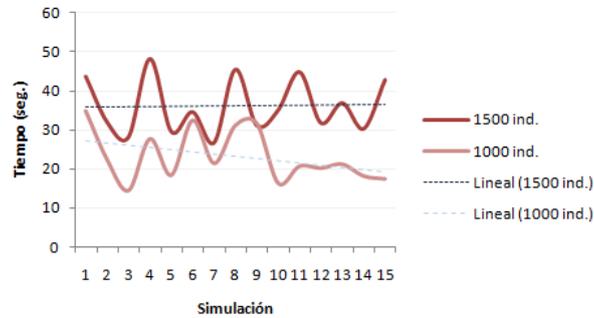


Figura 3. Tiempos de simulación para 15 ejecuciones con 1000 y 1500 individuos favoreciendo la comunicación

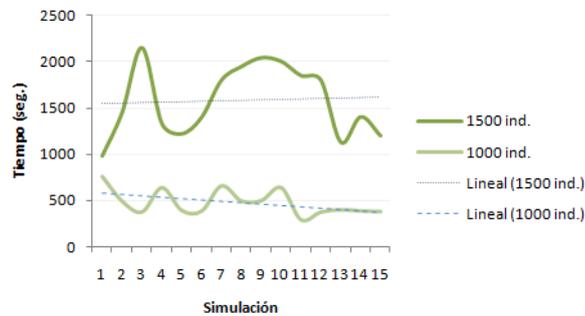


Figura 4. Tiempos de simulación para diferentes 15 ejecuciones con 1000 y 1500 individuos sin comunicación

A pesar de tener un sistema altamente dinámico, que permite realizar modificaciones en el entorno simulado de manera ágil y fácil de variar los parámetros, las simulaciones, según las necesidades del caso bajo estudio, pueden ser inabordables por los diferentes casos a tratar y el tiempo total consumido para cada caso que puede considerarse como inaceptable. En este sentido el cómputo de altas prestaciones nos permitirá reducir sensiblemente el tiempo de ejecución y poder lanzar un conjunto de simulaciones paramétricas en un clúster de altas prestaciones. En una primera fase de estudio se ha considerado no explotar el paralelismo del modelo sino utilizar el clúster para realizar simulaciones paramétricas y para ello se ha utilizado un sistema multicore basado en I5 quadcore y utilizando Distributed Parallel Processing Shell Script (PPSS, <http://code.google.com/p/ppss/>) que permite gestionar, ejecutar y monitorizar un conjunto de procesos sobre entornos multicores.

En este caso se ha calculado el *speedup* para mostrar la viabilidad de la propuesta y como se puede ver los resultados muestran que la ejecución distribuida escala muy bien. Es necesario analizar, en trabajos futuros, la extensión a un número mayor de *cores* y cómo afecta la jerarquía de memoria de los procesadores I5 a las ejecuciones paramétricas para un mayor número de individuos. Para el cálculo del *speedup* solo se han considerado individuos con comunicación, mínimo tiempo de reacción y máxima velocidad (20 años).

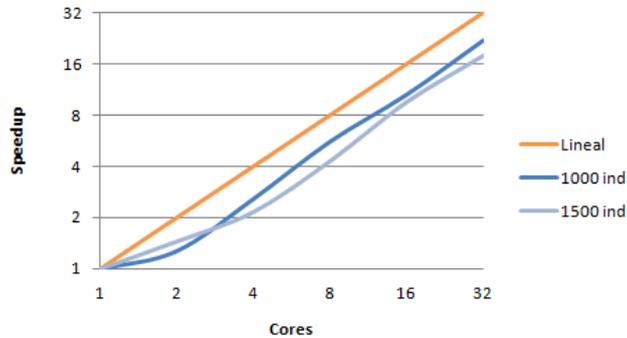


Figura 5. Speedup para simulaciones de diferentes individuos con comunicación

Con el sistema de simulación dinámico/parametrizable expuesto y la ayuda de sistemas *multicores* se ha desarrollado un sistema que permite a usuarios no expertos realizar simulaciones en forma ágil y rápida tanto en la modificación del entorno de simulación como la parametrización del modelo obteniendo resultados de manera efectiva y sin las largas esperas requeridas para completar dichos ciclos de simulación.

5 Conclusiones y trabajo futuro

La evacuación de edificios es un área interdisciplinaria que necesita de herramientas para obtener resultados y que permitan, desde diferentes puntos de vista, analizar en forma sistemática y cuantitativa los factores y procedimientos que afectan a las personas que se encuentran en una situación de emergencia. Algunos expertos consideran que la seguridad y buenos resultados en una evacuación se obtienen con el entrenamiento y los simulacros pero cada vez más los edificios son más complejos y las situaciones tan diversas que los problemas prácticos y el costo que representan son disuasorios en este tipo de entrenamiento.

Es por ello que las técnicas de simulación para la evacuación de emergencia atraen cada vez más el interés de los científicos de diferentes áreas ya que permite en forma simple y exhaustiva poder analizar las características de un edificio y las mejores reglas/protocolos de evacuación a un costo aceptable.

El presente trabajo desarrolla un modelo dinámico basado en agentes que permite definir diferentes reglas e interacciones con el entorno durante el tiempo de simulación. El modelo desarrollado es extensible a nuevas reglas/protocolos para que, de forma fácil, pueda evolucionar hacia reglas más complejas o protocolos de interacción entre los individuos. La validación funcional del modelo se ha realizado teniendo en cuenta los experimentos realizados por Camillen et ál. [6] y se han desarrollado experimentos de simulación en el presente trabajo considerando simulaciones de 1000 y 1500 individuos con diferentes parámetros de interrelación y validado el *speedup* de la simulación paramétrica donde se demuestra que se obtienen muy buenos resultados.

El trabajo futuro se orienta a mejorar el diseño del modelo para explotar sus características en sistemas de cómputo distribuido (Nro. de *cores*, jerarquía de

memoria y el tamaño de la simulación, distribución del algoritmo de simulación), desarrollar mecanismos que permitan incidir sobre la gestión de los flujos de personas en áreas limitadas/evacuación en las salidas que mejoren el flujo de ocupantes frente a estructuras cambiantes, incluir parámetros que potencien las opciones de simulación del modelo como podría ser la existencia de líderes predefinidos/colaboradores o también entornos que cambian con el tiempo (paredes, salidas y/o señales que desaparecen o se destruyen).

6 Bibliografía

1. Innes, J. M. Human Behavior under Stress. *Fire*, 67, 601-60, (1975)
2. Proulx, G. Movement of People: The Evacuation Timing. In P.J.DiNenno & W. D. Walton (Eds.), *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. (2002)
3. Nelson, H. E. & Mowrer, F. W. Emergency Movement. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Society of Fire Protection Engineers. (2002)
4. Pan, X., Han, C. S., Dauber, K., & Law, K. H. A Multi-agent Based Framework for the Simulation of Human and Social Behaviors during Emergency. (2006)
5. Dimakis, N., Filippoupolitis, A., Gelenbe, E.: Distributed building evacuation simulator for smart emergency management. *The Computer Journal*. (2010)
6. Camillen, F., Capri, S., Garofalo, C., Ignaccolo, M., Inturri, G., Pluchino, A., Rapisarda, A., Tudisco, S.; Multi agent simulation of pedestrian behavior in closed spatial environments. *Science and Technology for Humanity*. IEEE Toronto International Conference DOI: 10.1109/TIC-STH.2009.5444471 (2009)
7. Fujiyama, T, Tyler, N. Predicting the walking speed of pedestrians on stairs, *Transportation Planning and Technology*, 33:2, 177-202, (2010)
8. Pelechano, N., Malkawi, A.: Evacuation Simulation Models: Challenges in Modeling High Rise Building Evacuation With Cellular Automata Approaches. *Automation in construction* 17(4), (2008)
9. Glen, I.F., Galea, E.R., Kiefer Kevin, C.: Ship evacuation simulation: Challenges and solutions, *Discussion*. Society of Naval Architects and Marine Engineers 109, (2001)
10. Santos, G., Aguirre, B.E.: A Critical Review of Emergency Evacuation Simulation Models. In: *Workshop on Building Occupant Movement during Fire Emergencies*, (2004)
11. Fromm, J.: *The Emergence of Complexity*. Kassel university press, GmbH, Kassel (2004)
12. Wooldridge, M.: *An introduction to multiagent systems*. John Wiley & Sons, Inc., Chichester (2002)
13. Weiss, G.: *Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence*. MIT Press, Cambridge (1999)
14. Ji, Q., Gao, C.: Simulating Crowd Evacuation with a Leader-Follower Model. *International Journal of Computer Sciences and Engineering Systems* 1(4), (2007)
15. Murakami, Y., Minami, K., Kawasoe, T., Ishida, T.: Multi-Agent Simulation for Crisis Management. In: *Proceedings of the IEEE Workshop on Knowledge Media Networking* Washington DC, USA, (2002)
16. Helbing, D.: Agent-Based Simulation of Traffic Jams, Crowds, and Supply Networks. In: *Proceeding of the IMA 'Hot Topics' Workshop*, IMA, Minneapolis, MN, (2003)
17. Kota, R., Bansal, V., Karlapalem, K.: System Issues in Crowd Simulation using Massively Multi-Agent Systems. In: *Workshop on Massively Multi Agent Systems*, (2006)
18. Lightfoot, T.J., Milne, G.J.: Modeling Emergent Crowd Behavior. In: *Proc. of the 1st Australian Conf. on Artificial Life*, Canberra (2003)
19. Helbing, D., Farkas, I.J., Molnar, P., Vicsek, T.: Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. In: *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Springer, Berlin (2001)