

CIS1010TK01

Simulador de conductas humanas en situaciones de emergencia ocasionadas en lugares cerrados basado en sistemas multiagentes

EDGAR MAURICIO NOMESQUE SILVA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS
BOGOTÁ, D.C.
2010

CIS1010TK01

Simulador de conductas humanas en situaciones de emergencia ocasionadas en
lugares cerrados basado en sistemas multiagentes

Autor:

Edgar Mauricio Nomesque Silva

MEMORIA DEL TRABAJO DE GRADO REALIZADO PARA CUMPLIR UNO
DE LOS REQUISITOS PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO DE
SISTEMAS

Director

Fabio Antonio Avellaneda Pachón

Jurados del Trabajo de Grado

Enrique González Guerrero

Rafael Andrés González Rivera

Página web del Trabajo de Grado

<http://pegasus.javeriana.edu.co/~CIS1010TK01>

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS
BOGOTÁ, D.C.
Diciembre, 2010

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS**

Rector Magnífico

Joaquín Emilio Sánchez García S.J.

Decano Académico Facultad de Ingeniería

Ingeniero Francisco Javier Rebolledo Muñoz

Decano del Medio Universitario Facultad de Ingeniería

Padre Sergio Bernal Restrepo S.J.

Director de la Carrera de Ingeniería de Sistemas

Ingeniero Luis Carlos Díaz Chaparro

Director Departamento de Ingeniería de Sistemas

Ingeniero César Julio Bustacara Medina

Artículo 23 de la Resolución No. 1 de Junio de 1946

“La Universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus alumnos en sus proyectos de grado. Sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque no contengan ataques o polémicas puramente personales. Antes bien, que se vean en ellos el anhelo de buscar la verdad y la Justicia”

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero dar gracias a Dios por acompañarme durante el transcurso de mi carrera y traerme hasta este punto ya que sin él no hubiera podido desarrollar este trabajo de grado puesto que fue un reto grande. También agradezco a mi director el Ingeniero Fabio Antonio Avellaneda Pachón, por guiarme, por su tiempo y dedicación durante el desarrollo de este proyecto de grado.

Agradezco a mis Padres, Clemencia Silva Ávila y Víctor Julio Nomesque Velandia, porque me brindaron el todo el apoyo que necesite durante el desarrollo del proyecto, a mis hermanos Marcela y Henry por su apoyo y consejos durante el proceso, y también a mi novia Camila por apoyarme, entenderme y guiarme durante toda la elaboración de este trabajo de grado.

Contenido

INTRODUCCIÓN	10
I - DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRABAJO DE GRADO.....	11
1.1 OPORTUNIDAD, PROBLEMÁTICA, ANTECEDENTES	11
II - MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	13
2.1 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	13
2.1.1 <i>Simulación con Sistemas Multiagente</i>	13
2.1.2 <i>Evacuación</i>	14
2.1.3 <i>Simulaciones de evacuaciones distribuidas basadas en Sistemas Multiagentes</i>	15
2.2 ESTADO DE SIMPCE	17
III – JUSTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	21
3.1 JUSTIFICACIÓN	21
3.1.1 <i>Formulación del problema que se resolvió</i>	21
3.1.2 <i>Justificación</i>	21
3.2 OBJETIVOS	21
3.2.1 <i>Objetivo general</i>	21
3.2.2 <i>Fases Metodológicas o conjunto de objetivos específicos</i>	22
IV – DESARROLLO DEL TRABAJO.....	23
4.1 TIEMPO DE EVACUACIÓN REAL.....	23
4.2 MODELO DE AGENTES.....	25
4.2.1 <i>Etapa de Análisis AOPOA</i>	25
4.2.2 <i>Etapa de Diseño AOPOA</i>	26
4.2.2.1 <i>Definición de eventos por rol</i>	27
4.2.2.2 <i>Identificación de Agentes</i>	28
4.2.2.3 <i>Modelo de Comportamiento</i>	29
4.2.2.3.1 <i>Comportamientos agente Cuarto</i>	30
4.2.2.3.1.1 <i>Comportamiento estado de evacuación:</i>	30
4.2.2.3.1.2 <i>Comportamiento Comunicador:</i>	30
4.2.2.3.2 <i>Comportamientos agente Escapista:</i>	31
4.2.2.3.2.1 <i>Comportamiento - sentidos:</i>	31
4.2.2.3.2.2 <i>Comportamiento Hablar:</i>	31
4.2.2.3.3 <i>Comportamientos agente Rescatista:</i>	31
4.2.2.3.3.1 <i>Comportamiento - sentidos:</i>	31
4.2.2.3.3.2 <i>Comportamiento Hablar:</i>	31

4.2.2.3.4 Comportamientos agente Controlador de Cuartos:.....	32
4.2.2.3.4.1 Comportamiento Administrador de cuartos:.....	32
4.2.3 <i>Despliegue de agentes</i>	32
4.2.3.1 Análisis de despliegue.....	32
4.2.3.2 Diseño de despliegue.....	33
V – VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO	35
5.1 RENDIMIENTO DE LA SIMULACIÓN	35
5.1.1 <i>Normalización de los datos</i>	36
5.2 PRUEBAS RENDIMIENTO Y ESCALABILIDAD	37
5.3 COMPARACIÓN SITUACIÓN REAL.....	41
VI– CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	45
CONCLUSIONES	45
TRABAJOS FUTUROS	46
VI –POST-MORTEM.....	47
FASE METODOLÓGICA 1	47
FASE METODOLÓGICA 2	47
FASE METODOLÓGICA 3	47
FASE METODOLÓGICA 4	48
VII - REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	49
REFERENCIAS.....	49
VIII - ANEXOS	53
ANEXO 1. PROPUESTA TRABAJO DE GRADO.....	53
ANEXO 2. ESTADO DE SIMPCE	53
ANEXO 3. MAPA MENTAL MODELO SIMPCE (AGENTES).....	53
ANEXO 4. CÓDIGO FUENTE DEL SIMULADOR, MÓDULO RENDER Y MÓDULO LÓGICA. ...	53
ANEXO 5. VIDEO DE EJEMPLO DE SIMULACIONES UTILIZANDO EL RENDER DEL SIMULADOR.....	53
ANEXO 6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DETALLADO A DATOS DE SIMULACIONES.	53

Lista de Tablas

Tabla 1. Estado SIMPCE	19
Tabla 2. Mensajes entre personas	20
Tabla 3. Descripción roles	26
Tabla 4. Eventos por Rol	28
Tabla 5. Agente por rol	29
Tabla 6. Promedio del tiempo (en segundos) que tarda cada simulación	35
Tabla 7. Resultados prueba Jarque-Bera.....	36
Tabla 8. Promedios resultado de la comparación	41
Tabla 9. Comparación de resultados variando las condiciones de la simulación	43

Lista de Figuras

Figura 1. Modelo de Comportamiento.....	30
Figura 2. Modelo del Nivel del Sistema	33
Figura 3. Diagrama de Despliegue.....	34
Figura 4. Tiempo de ejecución vs. Número de personas (1 máquina).....	37
Figura 5. Tiempo de ejecución vs. Número de personas (2 máquinas)	38
Figura 6. Tiempo de ejecución vs. Número de personas (3 máquinas)	38
Figura 7. Tiempo de ejecución vs. Número de personas (4 máquinas)	39
Figura 8. Agrupación Tiempo de ejecución vs. Número de personas	40
Figura 9. Comparación tiempos simulador simpce 1.....	42
Figura 10. Comparación tiempos simulador simpce 2.....	42

ABSTRACT

The emergency evacuations have become a topic of great interest to humans, because in some cases to be not prevented, disasters happen which could have been avoided, that is why a people simulator using the multi-agent systems paradigm will help provide information for planning staff in emergency situations more real than a people simulation. The prototype simulator has been developed under a distributed environment helping to support the efficiency of a large number of people.

RESUMEN

Las evacuaciones en situaciones de emergencia se han convertido en un tema de gran interés para el ser humano, debido a que en algunos casos por no estar prevenido, suceden catástrofes las cuales se hubieran podido evitar, es por esto que un simulador de personas bajo el paradigma de sistemas multiagentes ayudara a proporcionar información para el personal de planeación en situaciones de emergencia mucho más real que un simulacro. El prototipo del simulador se ha desarrollado bajo un ambiente distribuido ayudando para que la eficiencia del sistema soporte gran número de personas.

INTRODUCCIÓN

Remontándose al pasado siglo I en Roma, época y lugar donde se construyó el Coliseo Romano, el cual se convirtió en el anfiteatro más grande en este imperio, con una capacidad para cincuenta mil espectadores, es importante pensar en la forma de acceso. En su construcción se implementaron setenta y seis entradas para agilizar el ingreso de todo el público, logrando así que todo el auditorio pudiera entrar y sentarse en su respectiva silla en un tiempo no mayor a quince minutos. Así mismo, en cualquier caso de emergencia gracias a la disposición de rampas y comunicación rápida con las salidas, tomaba solamente cinco minutos evacuar todo el coliseo [1].

Desde épocas como la del Imperio Romano, la humanidad ha venido preocupándose por el tiempo de evacuación de una edificación en situaciones de emergencia con fines de salvar miles de vidas humanas. Una importante acción que se realiza en pro de ayudar con dicha preocupación son los simulacros de evacuación, los cuales proporcionan información importante para los organismos de emergencia o para detectar riesgos que se puedan presentar en una emergencia real.

Sin embargo, estos simulacros no proporcionan información completamente veraz, debido a que las condiciones en que se realizan no son las reales y por lo tanto las reacciones que las personas puedan tomar posiblemente no sean las reales tampoco. Fue así como se originó el proyecto SIMPCE, trabajo de grado que plantea un modelo de simulación basado en un estudio psicológico en busca de mejorar los simulacros de emergencia, y cuyo prototipo inicial arroja resultados más veraces. Aunque logra plantear el prototipo, no cumple con la totalidad de variables expuestas en el modelo y no puede simular un gran número de personas.

Por consiguiente, el presente trabajo de grado como continuación a SIMPCE, busca ampliar dicho modelo para que sea posible la ejecución de cualquier simulación de personas en un espacio cerrado bajo un ambiente distribuido, realizando en primera instancia un marco teórico referente al tema, y un estado del arte. Luego se plantea un método apoyado bajo teorías físicas, para obtener el tiempo de simulación real, con lo que anteriormente no se contaba, después por medio de la metodología AOPOA se expone un nuevo modelo de agentes basándose en el que ya existía, y un modelo de despliegue para poder realizar el simulador distribuido. Finalmente se realiza una validación del prototipo junto con unas conclusiones y propuestas de trabajos futuros.

I - DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRABAJO DE GRADO

1.1 Oportunidad, Problemática, Antecedentes

Vivimos en una era en la cual se debe estar prevenido a cualquier tipo de catástrofe con el fin de salvar vidas humanas. Por esto, el hombre se ha venido preocupando por el tiempo en que se demorarían las personas evacuando una edificación cerrada en una situación de emergencia, ayudando a evitar un gran número de muertes, pues entre menor sea este tiempo, existe menos probabilidad de que las personas se queden encerradas exponiéndose a cualquier tipo de peligro en una situación como estas [2].

Se pueden encontrar situaciones como incendios, los cuales estadísticamente son la mayor causa para producir una catástrofe en un edificio. Pero, además otras posibles causas son las amenazas de bomba, escapes de gas, o simples errores humanos como derramar una sustancia química que implique el desalojo inmediato. Una última posible causa puede ser los desastres naturales como terremotos o inundaciones [3].

Tradicionalmente existen los simulacros con el fin de preparar a las personas para este tipo de emergencias, lo cual tiene la desventaja de ciertas limitaciones, en particular en lo referente al realismo, pues las personas involucradas no conocen su reacción psicológica frente a una situación de emergencia real, como por ejemplo la presión de estar en peligro lo cual altera los resultados del simulacro, además del costo que tiene una actividad de este estilo [4].

Colombia se encuentra en una región caracterizada por altos niveles de ocurrencia de terremotos. Específicamente en Bogotá se han presentado varios sismos fuertes en el pasado, por lo cual se predice que en el futuro es posible que reaparezcan estas amenazas estimando graves daños a la ciudad. Es por esto que Bogotá se prepara por medio de simulacros de evacuación siendo una manera de prevención para cualquier catástrofe de este tipo, sin embargo debido a que no existe una situación de pánico real es posible que los resultados no sean los correctos, arrojando datos no veraces de la prueba [5, 6].

Es por esto que SIMPCE (Simulador de Movilidad de Personas en espacios Cerrados), trabajo de pregrado en Ingeniería de Sistemas de la Pontificia Universidad Javeriana, hace una representación más fiel a la realidad de las simulaciones de evacuación, abstrayendo en un modelo de multiagentes las características psicológicas que influyen sobre las personas en una situación de pánico, específicamente las reacciones condicionadas por el *sexo de la persona*, el *nivel de conocimiento del sitio*, la *compañía* (si se encuentra con familiares o amigos), y la *edad* [6].

Dicho modelo llega a una fase de validación, desarrollándose un prototipo el cual no incluye toda la caracterización del comportamiento humano que ha sido extraída después de una gran investigación psicológica y plasmada en dicho modelo. Además, la veracidad del prototipo en simulaciones con grandes cantidades de personas tampoco se pudo probar, debido al gran consumo de recursos de la máquina [6].

Diferentes alternativas como trabajos futuros de SIMPCE surgen, con el fin de encontrar un mejor producto, arrojando resultados para situaciones de emergencia que tal vez nunca fueron evaluadas o tenidas en cuenta por las limitaciones del prototipo desarrollado. Como por ejemplo, la no implementación completa del modelo psicológico o al ser un desarrollo monolítico, es decir corriendo todo en una sola máquina, abre paso a un nuevo trabajo de grado universitario dándole continuidad a este tema tan importante hoy en día, las simulaciones de evacuaciones en situaciones de emergencia [7].

Este trabajo se centra entonces, en reimplementar las características contempladas en el modelo original propuesto, y en diseñar las estrategias necesarias para que la simulación se pueda realizar en un entorno distribuido con el fin de aumentar la cantidad de personas o la complejidad de los escenarios, y dar mayor veracidad a los resultados.

II - MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 Marco Teórico y Estado del Arte

2.1.1 Simulación con Sistemas Multiagente

Al hablar de simulación en general, se hace referencia a la imitación del comportamiento de un sistema y estructura de un modelo experimental [8] en la búsqueda de resultados los cuales serán transferibles a la realidad. Las simulaciones son usadas como estudios de inteligencia artificial aplicando técnicas como sistemas multiagentes [9], pero existe un problema con este último tipo de simulaciones, que generalmente los métodos usados no son reusables, o son muy acoplados a la red [10].

Cualquier tipo de fenómeno real puede ser simulado bajo un conjunto de fórmulas matemáticas, como por ejemplo condiciones del clima, reacciones químicas, reacciones atómicas, procesos biológicos, etc., sin embargo el nivel de complejidad de la simulación se basa en el número de variables que se incluyan en el modelo representativo del mundo a simular; entre más compleja sea la simulación, el programa se comportará más acorde a la realidad [11]. El principal fin de las simulaciones es entender el comportamiento del sistema e indagar los resultados para llegar a conclusiones sobre el fenómeno que se estaba simulando, teniendo como ventaja el control total del tiempo, ya que este puede ser acelerado. Además, el modelo puede ser modificado rápidamente con el fin de analizar diferentes escenarios a un bajo costo. También es importante compararlo con los resultados de algún sistema similar para garantizar la validez de la simulación [12-14].

En SIMPCE, se realizó la selección del paradigma de simulación más adecuado para la simulación de personas en evacuación. Luego de evaluar ciertas características con cada uno de los modelos estudiados: Modelado Macroscópico, Modelado Microscópico de entidades con utilización de colas y funciones estocásticas, Teoría de juegos, Autómatas celulares, Sistemas Multiagentes y Modelo de fuerzas sociales, el paradigma que mejor cumplió con las características deseadas fue sistemas multiagentes [6, 9], así este trabajo de grado fue desarrollado bajo este paradigma.

Un sistema multi-agente puede ser definido como un programa que actúa de forma autónoma, comunicándose con otros agentes, usa conocimiento explícito y puede ser visto como un sistema distribuido en donde varios agentes tienen acciones independientes colaborándose con otros agentes con el fin de alcanzar un objetivo, además tiene la habilidad de interactuar con otros agentes sobre una red de comunicación [8, 15].

Generalmente un agente autónomo necesita de muchos más recursos computacionales que un objeto simple, pues él mismo planea y decide sus propias acciones partiendo de información del ambiente en donde se encuentre y de su conocimiento a priori [16].

Existen varias plataformas para simular agentes como Repast, Swarm, Quicksilver, VSEit desarrolladas en el lenguaje Java. Después de un estudio realizado por Tobias y Hofmann se encontró que la mejor entre ellas es Repast; en dicho estudio evaluaron los siguientes criterios: facilidad de uso, instalación, comunicación entre agentes, soporte a gran cantidad de agentes y administración de agentes [17].

Sin embargo, hoy en día existen muchos más frameworks para simular agentes como Spark (*A Generic Simulator for Physical Multi-agent Simulations*) [18], el cual tiene como fin proveer flexibilidad para crear diferentes tipos de agentes fácilmente, y actualmente es usado por el simulador de la liga RoboCup [19]. También existe SPADES (*System for Parallel Agent Discrete Event Simulator*) [10], el cual introduce la técnica de *Software-in-the-loop* [10], la cual hace un seguimiento al tiempo de procesamiento de un agente y este se ve reflejado en los resultados, adicionalmente soporta ejecuciones distribuidas de los agentes a través de múltiples sistemas.

Por su parte, SIMPCE ha tenido en cuenta el framework institucional basado en agentes, desarrollado por el Departamento de Ingeniería de Sistemas de la Pontificia Universidad Javeriana, llamado BESA (Behavior-oriented Event-driven Social-based Agent-framework), implementado en el lenguaje Java [6, 20].

Es así como finalmente por facilidad en términos de soporte, la comunidad que ha generado BESA puede llegar a ser un recurso. SIMPCE escogió el framework BESA como plataforma para simular agentes, y adicionalmente un punto muy importante es la continuidad que se le pudo dar al trabajo de grado SIMPCE, ya que se ha escogido la plataforma que promueve la Pontificia Universidad Javeriana.

2.1.2 Evacuación

Hoy en día evacuar una edificación se ha convertido en un tema muy importante y de mucha seriedad, ya que al contar con una evacuación satisfactoria se pueden salvar muchas vidas humanas interviniendo factores de riesgo en cualquier tipo de emergencia, reduciendo y previniendo muertes y lesiones. Por esto es importante indagar y analizar la información durante la evacuación, pues la eficiencia y efecto de una evacuación no solo se basa en comprender la situación de emergencia [21].

Planes de evacuación son desarrollados para cada edificación, ayudando a garantizar de esta forma la mejor seguridad y ruta más rápida de evacuación de todas las personas que se encuentren en la estructura. Estos planes buscan mejorar o garantizar el tiempo de evacuación mínimo que debe cumplir dicha edificación cerrada, por lo tanto para calcular este tiempo puede ser a través de simulacros, o simulaciones de flujo de personas en la construcción [12].

Según la dirección de prevención y atención de emergencias (DPAE) [22] y el simulacro internacional de emergencias, se deben seguir los siguientes pasos para una evacuación segura: primero, identificar y conocer las vías de salida del sitio; segundo, identificar los puntos de encuentro; tercero, identificar y reducir los riesgos que puedan presentarse en la

salida al punto de encuentro; y cuarto, al sonar la alarma de evacuación dirigirse al punto de encuentro, y no olvidarse de los niños y adultos mayores [23].

Por lo tanto, en la búsqueda de modelar en un simulador las evacuaciones, en 1999 Court fue el pionero en modelos de simulación para planeación de evacuación en situaciones de emergencia, pero sin tener en cuenta elementos psicológicos que influyeran en dicha simulación[24], por el contrario del modelo de SIMPCE, que se basa en unos fundamentos psicológicos para realizar la caracterización del comportamiento humano en situaciones emergentes, como el miedo, el pánico, y la ansiedad [6]. En la sección 2.2 se profundizará en el modelo planteado y hasta qué punto ha llegado en el prototipo realizado por los estudiantes autores del trabajo de grado SIMPCE.

2.1.3 Simulaciones de evacuaciones distribuidas basadas en Sistemas Multiagentes

Hoy en día la mayoría de las pruebas que se ejecutan sobre un sistema multiagente cuando se encuentra en la etapa de evaluación y se está esperando que funcione como se esperaba, no son de forma concurrente, tan solo se simulan en una sola máquina [25]. Pero lo cierto es que existen varias razones por las cuales usar simulaciones distribuidas como por ejemplo, obtener beneficios en cuanto a velocidad, reduciendo el tiempo de ejecución de la simulación [8].

También es cierto que lo que se busca mejorar al distribuir un sistema es la escalabilidad, la cual es definida en cómo el rendimiento de una aplicación se comporta si el tamaño del problema aumenta y la arquitectura que lo está ejecutando también aumenta [26].

A diferencia de los procesadores en paralelo que se caracterizan por ser fuertemente acoplados y que comparte el mismo espacio de memoria principal [24]. La eficiencia en un sistema paralelo se puede definir como la velocidad obtenida por el número de procesadores, dividido entre el número de procesos, es decir qué tanto se están utilizando los procesadores para así que obtener eficiencia del cien por ciento. Esto significa que todos los procesadores se están usando completamente todo el tiempo [8].

Los agentes móviles son aquellos que tienen la habilidad de migrar bajo su propio control dentro de una red heterogénea, mientras que los agentes estacionarios solo se ejecutan en donde empezaron su ejecución. Es por esto que los agentes móviles son naturalmente apropiados para aplicaciones distribuidas con el hecho de que pueden migrar a través de un grupo de máquinas, enviar agentes hijos a máquinas en paralelo, o permanecer como agente estacionario e interactuar con fuentes remotamente. Entre las ventajas de utilizar agentes móviles se encuentran [27]:

- Eficiencia: Los agentes se podrían mover en un amplio conjunto de fuentes de información, obteniendo información relevante únicamente.

- Flexibilidad: no se requerirá que se pre instalen procedimientos remotos para operaciones remotas con datos, aunque existirá un agente especial instalado en todos los computadores para darle soporte a los agentes móviles.
- Adaptabilidad para operaciones desconectadas: los agentes pueden acoplarse en un ambiente en el cual durante la migración, la red no es muy estable, como por ejemplo una red inalámbrica.

En la actualidad existen muy pocos simuladores de evacuación basados en sistemas multiagentes y que se desarrollen en un ambiente distribuido, sin embargo *Kobayashi* ha construido un simulador con el fin de ayudar en la búsqueda de un mejor diseño de ciudades seguras, obteniendo como resultado un alto nivel de vida en cuanto a seguridad en un momento de desastre [16].

Dicho simulador representa un grupo de personas evacuando de una ciudad en el momento que ocurre un desastre; para ello, representó a cada persona como un agente autónomo, por lo tanto simular entre 10 mil y 100 mil agentes móviles, requiere de muchos más recursos computacionales que si fuera un objeto simple [16].

Existe un aspecto importante cuando se habla de computación distribuida y es cómo dividir el problema dado en cada unidad de simulación. Una opción es dividir el mapa en pequeños rectángulos - sub aéreas, así cada unidad de simulación será la encargada de un área. Esta fue la subdivisión que *Kobayashi* [16] ha adoptado además de representar la ciudad con un grafo [28]. Sin embargo, sólo logró ejecutar simulaciones hasta con 200 agentes móviles, proponiendo como un trabajo extra una optimización en cuanto a software y hardware específicamente en aspectos relacionados con la red.

Por otro lado, *Lihua* habla de ambientes virtuales en red, lo que en otras palabras es una simulación distribuida de un mundo virtual, en el que múltiples usuarios (avatares) pueden interactuar entre ellos, sin importar que no estén geográficamente en el mismo sitio. Dichos ambientes ayudan a que uno de estos avatares pueda automáticamente actualizarse y actuar de acuerdo a la última información recibida del ambiente en que se encuentre [29].

Por último, *Bikramjit* propone un simulador con inteligencia sobre el terreno, el cual se basa en la premisa de que usualmente las simulaciones de multitudes basadas en agentes, abstraen al peatón como un agente autónomo. Así el nivel de realismo de la simulación se basa en qué tan complejo sea cada agente y el tamaño de la multitud. Es por esto que *Bikramjit* desarrolló un complejo modelo de comportamientos realistas tales como: evitar obstáculos, clasificación, evadir colisiones, entre otros [30].

Principalmente, lo que busca este modelo por capas es distribuir toda esta inteligencia nombrada anteriormente sobre el terreno en el que se está ejecutando la simulación, quedando de esta forma el agente persona quien representa al peatón mucho más liviano y disminuyendo su carga [30]. Para crear el movimiento básico del agente y que evitará obstáculos, usaron el proceso de decisión de Markow [31]. Debido a sus limitaciones en cuanto a la creación de los escenarios de inicio, decidieron procesarlo en paralelo, en un

procesador multi-core, o un clúster de máquinas, demostrando de esta manera la mejor eficiencia que se tiene al cambiar la simulación monolítica a paralela [30].

Por lo tanto, al cambiar la simulación monolítica actual que usa SIMPCE, a una simulación en paralelo, se obtendrá eficiencia y poder realizar una simulación más compleja que supere el número de personas simuladas en la primera versión.

2.2 Estado de SIMPCE

A continuación se mostrarán los resultados del estudio psicológico realizado en SIMPCE [6], abstrayéndolo a un conjunto de agentes con sus respectivos actuadores y sensores.

Existen tres factores fundamentales que influyen en la toma de decisión o cambio de comportamiento en los seres humanos cuando se enfrentan a una situación de emergencia: *género*, *nivel de conocimiento del sitio* y *nivel de compañía*. A partir de estos elementos nace un agente **Persona** quien se encargará de simular el movimiento que debe realizar luego de tomar su decisión teniendo en cuenta estas tres variables. Además, se define agente **Escapista** quien tiene como objetivo evacuar la edificación y tiene todas las características de una persona, al igual que el agente **Rescatista** quien además tiene otro objetivo el cual es ayudar a los agentes escapistas a salir de la edificación [6]. Adicionalmente, el agente **Habitación** el cual se encarga de la administración de una sección de la edificación, y gestiona la interacción entre las personas que se encuentren en ella [6].

Al final se encontró como resultado de implementación en simpce 1 lo siguiente:

- Agente rescatista con **100% conocimiento del sitio (Hombre)**.
- Fallas en toma del tiempo de simulación real.

La siguiente tabla describe las características de cada agente más en detalle, junto con los actuadores, sensores y mensajes para la interacción entre agente:

Características	Descripción
Agente Escapista	Objetivo: evacuar la edificación <ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de conocimiento del sitio = 100% (Alto) • Infiere ruta más corta para evacuar
Agente Escapista	Objetivo: evacuar la edificación <ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de conocimiento del sitio = Alto (Superior al 66%), Medio (superior a 33% e

Agente Rescatista	<p>inferior a 66%) y Bajo (inferior a 33%)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exploran: al agotar rutas conocidas pueden explorar las demás. <p>Objetivo: Ayudar a los agentes escapistas a salir del sitio.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tiene 100% de conocimiento del lugar (conoce todas las rutas de escape) • Tiene como objetivo persuadir en su “Área de responsabilidad” (número de cuartos asignados) a las personas por medio de Parlatrón para que lo sigan. • No abandonara la edificación hasta que todas las personas de si área de responsabilidad salgan. • Puede emitir mensajes de calma. • Puede emitir mensajes de guía.
Agente Habitación	Administración espacial de una región determinada: utilización del espacio en que las personas habitan como la resolución de las interacciones físicas, visuales y verbales.
Agente Persona: Visiotrón	Percibe en el rango de visión los objetos y las personas, dicha información proviene del agente habitación
Agente Persona: Audiotrón	Mensajes verbales del rango de escucha enviados por el agente habitación
Agente Persona: Positrón	Posición en la habitación enviada por el agente habitación
Agente Persona: Forzatrón	Fuerza que se le debe aplicar al agente, envía un mensaje al agente habitación
Agente Persona: Parlatrón	Envía mensajes verbales a otras personas a través del agente habitación dependiendo del rango de escucha de ellos
Nivel de compañía: Solo	Único objetivo salir de la edificación lo más rápido que pueda.
Nivel de compañía: dependiente	<p>Objetivos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Salvar a las personas de las que es dependiente. • Salvarse el mismo. • Ubicar a las personas dependientes y salir juntos, buscando en otros cuartos mediante mensajes de búsqueda.
Hombre con <u>alto</u> reconocimiento del espacio	<ul style="list-style-type: none"> • Maneja 100% de la construcción

Hombre con <u>alto</u> reconocimiento del espacio	<ul style="list-style-type: none"> • Maneja 100% de la construcción • Puede emitir mensajes de calma. • Puede emitir mensajes de guía.
Hombre con <u>medio</u> reconocimiento del espacio	Conoce la mitad de caminos que se encuentran entre el cuarto en que se encuentra y las salidas de emergencia.
Hombre con <u>bajo</u> reconocimiento del espacio	<p>No conoce el sitio, por lo tanto tiene dos opciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Guiarse por el camino que toman las otras personas. • Experimentación de caminos. <p>Además puede experimentar pánico, lo cual lo conduce a este estado perdiendo el sentido de orientación.</p>
Mujer con <u>alto</u> reconocimiento del espacio	<ul style="list-style-type: none"> • Maneja 100% de la construcción • Puede emitir mensajes de calma. • Puede emitir mensajes de guía.
Mujer con <u>medio</u> reconocimiento del espacio	Conoce la mitad de caminos que se encuentran entre el cuarto en que se encuentra y las salidas de emergencia.
Mujer con <u>bajo</u> reconocimiento del espacio	<p>No conoce el sitio, por lo tanto:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Experimentación de caminos. <p>Además puede experimentar pánico, lo cual lo conduce a este estado perdiendo el sentido de orientación.</p>
Edad: menor de 10 años o mayor de 75 años y nivel de compañía: solo	<ul style="list-style-type: none"> • Permanecerá quieto y enviara mensajes a través de su Parladrón de auxilio. • Cualquier persona con conocimiento del sitio medio o alto que reciba este mensaje de auxilio la ayudara, guiándola hasta la salida.

Tabla 1. Estado SIMPCE

A continuación una descripción detallada de los mensajes posibles para la interacción entre personas y la habitación, especificando quien es el receptor y emisor:

Mensaje	Descripción	Emisor	Receptor
Mensaje de pánico	Por medio de Parladrón ejercerá efecto usualmente sobre personas con nivel de conocimiento del sitio bajo y algunas veces sobre las de nivel medio.	Escapista	Persona
Mensaje de calma	Objetivo: desactivar estado de pánico. <ul style="list-style-type: none"> Una vez el escapista reciba un mensaje de calma inmediatamente recobrará su sentido de orientación. 	Persona	Escapista
Mensaje de búsqueda	Mensaje directo de escapista a escapista, en tal caso que el nivel de compañía sea dependiente.	Escapista	Escapista
Mensaje de guía	Estimular a las otras personas que sigan al emisor hasta la salida.	Persona	Escapista
Mensaje de ayuda	Atrae la atención para que los demás emitan mensajes de guía. Emitido por <ul style="list-style-type: none"> Niños (menor 10) Anciano (mayor 75) Con nivel de conocimiento bajo y en estado de pánico.	Escapista	Persona
Mensaje de localización	Emite la posición actual he identificador propio como persona, y lo escuchan únicamente personas que lo estén buscando.	Escapista	Persona

Tabla 2. Mensajes entre personas

III – JUSTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

3.1 Justificación

3.1.1 Formulación del problema que se resolvió

¿Cómo lograr una simulación más acorde a la realidad de evacuación de personas en una situación de emergencia presentada en una edificación?

3.1.2 Justificación

La técnica de simulaciones es usada habitualmente para predecir o resolver diferentes escenarios hipotéticos con el fin de tomar medidas o mejorar las fallas detectadas en dicha simulación[32].

En la búsqueda de realizar simulaciones de evacuaciones más reales en donde los datos arrojados sean más confiables, bajo el contexto de SIMPCE, es necesario realizar pruebas que involucren grandes cantidades de personas apoyándose en una simulación distribuida, la cual mejora el realismo de un simulacro y arroja muchos mejores resultados después de su ejecución [4]. A su vez, es necesario adaptar la totalidad de las características psicológicas abstraídas en el modelo desarrollado por SIMPCE.

Como resultado se estará aportando a la construcción de un producto final que será útil para arquitectos o el comité de emergencias donde se encuentran el cuerpo oficial de bomberos, la defensa civil, policía; como medida de predicción en una emergencia arrojando datos claves como resultado de una simulación de evacuación [5].

3.2 Objetivos

3.2.1 Objetivo general

Ampliar SIMPCE a un ambiente de simulación distribuido e integrar la totalidad de la caracterización psicológica utilizando el framework BESA.

3.2.2 Fases Metodológicas o conjunto de objetivos específicos

- Analizar SIMPCE recopilando en un documento el estado actual para así darle continuidad al trabajo futuro propuesto.
- Implementar todas las características del modelo psicológico sobre el prototipo que ya ha sido desarrollado generando una versión dos.
- Analizar y diseñar el despliegue del modelo de agentes en un ambiente distribuido y presentar los resultados obtenidos por las simulaciones.
- Validar el modelo de despliegue junto con su presentación de datos en la implementación de una última versión del prototipo bajo un ambiente distribuido.

IV – DESARROLLO DEL TRABAJO

A continuación se realizó una investigación enfocada en hallar cuál era el tiempo que una evacuación podía tomar hasta que saliera la última persona de la edificación. Teniendo en cuenta todos los desplazamientos que dicha persona realizaría, se obtendrá un tiempo real de evacuación, el cual es diferente al tiempo de ejecución de la simulación el cual varía dependiendo del ambiente en donde sea ejecutada; este último fue el único tiempo tenido en cuenta por simpce 1.

4.1 Tiempo de Evacuación Real

El tiempo total de evacuación de las personas de una edificación, en el caso de presentarse cualquier situación de emergencia, es de vital importancia para evitar muertes no deseadas, ya que entre menor sea este tiempo, menor será el riesgo que corren las personas al interior de la edificación. Pero dicho tiempo está estrictamente ligado al diseño del edificio o espacio cerrado en donde suceda la emergencia y al número de personas que deben evacuar teniendo en cuenta la caracterización psicológica de cada individuo, la cual ha sido estudiada en SIMPCE [5, 6].

Es por esto que dicho tiempo de evacuación fue calculado para efectos de la simulación, como el tiempo promedio que una persona se demoraría en recorrer una distancia, teniendo en cuenta su edad, sexo y peso, tomando el tiempo de la última persona en evacuar la edificación, y poder obtener el tiempo real de evacuación independiente de la máquina o máquinas en que se corra el simulador; todo lo anterior está soportado bajo un estudio físico que se realizó y que a continuación se explicará más detalladamente:

Para que exista el desplazamiento de una persona que está en estado de reposo, desde un lugar a otro, el cuerpo debe ejercer una fuerza que provoque un cambio de estado a movimiento, teniendo en cuenta el rozamiento que el individuo ejerce sobre la superficie en donde se encuentre [33].

Por lo tanto, la *fuerza* se define como una magnitud vectorial la cual puede modificar la velocidad o vencer la inercia en que se encontraba un cuerpo, cambiando el estado a movimiento si se encontraba inmóvil, produciendo un efecto dinámico. La segunda Ley de Newton o Ley Fundamental de la Dinámica determina una relación entre la fuerza y variación de la cantidad de movimiento de un cuerpo, indicando que la masa y aceleración de un cuerpo son directamente proporcionales a la fuerza [34]:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (1)$$

Partiendo de la formula (1), la *aceleración* se define como una magnitud vectorial de igual manera que la fuerza, que relaciona los cambios en la velocidad de un cuerpo en movimiento con respecto al tiempo que tarda en producirse, por lo tanto la aceleración media de un objeto en un intervalo de tiempo es [34]:

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \quad (2)$$

Pero a su vez la velocidad media es el desplazamiento sobre el tiempo empleado [34], y asumiendo que la velocidad inicial de la persona es cero, el tiempo que se demora una persona en llegar a un determinado sitio y aplicándole una fuerza inicial, pero sin tener en cuenta aun el rozamiento con el piso es:

$$t = \frac{\vec{r}m}{\vec{F}} \quad (3)$$

En donde \vec{r} es el vector desplazamiento, m la masa de la persona, y \vec{F} la fuerza inicial ejercida para lograr cambiar el estado de reposo al cuerpo.

Adicionalmente, la *fuerza de rozamiento*, que se define como la fricción entre dos superficies en contacto oponiéndose al movimiento entre ellas, debe de ser tomada en cuenta en la sumatoria de fuerzas y se define como $\vec{F}_r = \mu\vec{N}$ donde μ es el coeficiente de rozamiento entre ambas superficies y N la fuerza normal igual a masa por gravedad en magnitud [34, 35].

De esta manera, el tiempo que un cuerpo se demora en recorrer una distancia \vec{r} , partiendo del reposo en consecuencia a una fuerza \vec{F} , y teniendo en cuenta la fuerza de rozamiento dinámica que experimentan las dos superficies es:

$$t = \frac{\vec{r}m}{\vec{F} - \vec{F}_r} \quad (4)$$

Luego de realizar este análisis, el cual fue hecho con el fin de poder obtener en el simulador el tiempo real que una evacuación tomaría, es necesario conocer el valor de la fuerza ejercida sobre la persona para que esta empiece a desplazarse y a su vez el coeficiente de rozamiento que existe entre este cuerpo y el piso para conocer la fuerza de rozamiento influyente.

En promedio una persona adulta (definido por SIMPCE como mayor a 10 años, y menor a 65 años) se desplaza a una velocidad de 10 km/h, y una niño (menor a 10 años) a 6km/h al igual que un adulto mayor (mayor a 65 años) [36], para efectos de la simulación se asumió que el coeficiente de rozamiento tomado fue entre goma (suela de zapato) y tapete, el cual es $\mu = 0.3$ [37].

Partiendo de esto se pudo conocer cuánta fuerza era necesaria aplicar a cada agente para que simulara correctamente un desplazamiento coherente a la realidad, el cual depende de su masa y edad, como se muestra a continuación:

$$\vec{F} = \frac{\vec{r}m}{t} + \mu mg \quad (5)$$

De esta forma r dependerá de la edad al igual que t , obteniendo estos valores del promedio de la velocidad a la que una persona se desplaza, y m es la masa que puede ser parametrizable para cada agente.

4.2 Modelo de Agentes

Partiendo del estudio psicológico acerca de los comportamientos que las personas adoptarían en una situación de emergencia que se realizó en el trabajo de grado SIMPCE, junto con los agentes abstraídos *Escapista*, *Rescatista*, y *Habitación*, los cuales nacieron principalmente de la metodología Macal y North [38], se decidió seguir la metodología AOPOA [39] (aproximación organizacional para programación orientada a agentes) para elaborar un modelo de agentes que mostrara los diferentes comportamientos entre ellos.

La Metodología AOPOA nace como un proyecto de la Pontificia Universidad Javeriana desarrollado por Diana Ahogado y Ana María Reinemer, aportando al gran proyecto ASMA (Arquitectura para Sistemas Multiagentes) también perteneciente al grupo de investigación SIDRe de la Universidad Javeriana, el cual busca brindar herramientas metodológicas y computacionales para la facilidad en la construcción de aplicaciones basadas en agentes [20].

El principal objetivo de esta metodología es guiar en el proceso de diseño de sistemas multiagentes mediante tres etapas: análisis, diseño, y despliegue, basándose en una descomposición jerárquica de roles los cuales serán unidades responsables las cuales alcanzarán metas que contribuyen para la solución del objetivo global del sistema, junto con la detección de vínculos de cooperación entre el conjunto de roles [20, 39].

4.2.1 Etapa de Análisis AOPOA

Esta etapa de análisis ya se ha realizado en SIMPCE, identificando el objetivo global del sistema, el cual es que el agente persona evacue la edificación cuando se presente la situación de emergencia, adaptando el comportamiento descrito en la caracterización psicológica realizada, y además teniendo en cuenta que el agente rescatista además de su objetivo global, tiene como objetivo ayudar a los agentes escapistas a salir del sitio [6].

Sin embargo, teniendo en cuenta lo anterior y la etapa de análisis de AOPOA para el modelo de agentes del simulador de evacuación perteneciente a este trabajo de grado, se descompuso el sistema en entidades autónomas distribuyendo la complejidad del problema en roles como lo propone la metodología [39]. A continuación se presentaran los principales roles detectados para el simulador de evacuación de personas:

Rol	Rol padre	Descripción
1.Persona	Habitación	El principal objetivo de la persona es salir de la edificación

		independiente de la caracterización psicológica con la que cuenta.
2.Escapista	Persona	Al contar con las características del rol de su padre, tiene como objetivo principal evacuar, pero además su nivel del conocimiento del sitio, edad y sexo es variable.
3.Rescatista	Persona	Además de su objetivo de evacuar de la edificación, tiene otro objetivo el cual es ayudar a los escapistas a salir del sitio, y su conocimiento del sitio es alto.
4. Habitación	Simulador de evacuación distribuido	Es el medio por el cual las personas se movilizan, o se comunican con las demás personas en busca de la salida del cuarto.
5. Simulador de evacuación distribuido		Contiene un conjunto de cuartos y por lo tanto conoce el estado de toda la simulación del piso.

Tabla 3. Descripción roles

4.2.2 Etapa de Diseño AOPOA

En esta etapa, AOPOA plantea realizar un diseño de los agentes partiendo de una definición de eventos para cada uno de los roles identificados en la etapa de análisis, luego cuales son los componentes del estado interno de cada rol para que las respuestas esperadas por cada eventos sean las adecuadas, y finalmente identificar los agentes que relacionan a cada rol definido junto con sus comportamientos [20].

4.2.2.1 Definición de eventos por rol

En la **Tabla 3. Eventos por rol** se especificarán los eventos a los que responderá cada rol de forma más detallada:

Rol	Eventos	Descripción	Datos del evento	Descripción de respuesta	Fuente del evento
1.Persona	Evacuar	Significa que la persona debe salir de la edificación	-	-	Rol 4: Cuarto
	Mensaje de Ayuda	Ver 2.2 Estado de SIMPCE, Tabla 1. Estado SIMPCE	Id_Persona emisora	Mensaje de guía	Rol 4: Escapista
	Mensaje de pánico	Ver 2.2 Estado de SIMPCE, Tabla 1. Estado SIMPCE	-	-	Rol 4: Escapista
	Mensaje de Localización	Ver 2.2 Estado de SIMPCE, Tabla 1. Estado SIMPCE	Id_Persona emisora, Posición actual	Mensaje de guía	Rol 4: Escapista
2.Escapista	Mensaje de calma	Ver 2.2 Estado de SIMPCE, Tabla 1. Estado SIMPCE	-	-	Rol 4: Persona
	Mensaje de Guía	Ver 2.2 Estado de SIMPCE, Tabla 1. Estado SIMPCE	Id_Persona emisora	Posición destino	Rol 4: Persona
	Mensaje de Búsqueda	Ver 2.2 Estado de SIMPCE, Tabla 1. Estado SIMPCE	Id_Persona objetivo	Mensaje de Localización	Rol 4: Escapista
3.Rescatista	Mismos eventos del rol persona	-	-	-	-
4.Habitación	Fuerza	Aplica la fuerza a la persona que le hizo la petición, simulando el desplazamiento de la misma.	Vector_fuerza, Id_Persona emisora	-	Rol 1: Persona.

5.Conjunto de Habitaciones - Piso	Visión	Conoce el número de personas que hay en un rango de visión.	Id_Persona emisora	Lista de personas que hay en el rango de visión de la persona emisora	Rol 1: Persona
	Posición	Sabe exactamente dónde se encuentra ubicada persona dentro de los límites del cuarto.	Id_Persona emisora	Posición actual X, Y de la persona emisora	Rol 1: Persona
	Mensajes: Localización Búsqueda Guía Pánico Calma Ayuda	Transmite los mensajes anteriores siendo el medio de comunicación entre el emisor y el receptor del mensaje.	(Dependiente a cada mensaje)	(Dependiente a cada mensaje)	Rol 1: Persona
	Evacuar	Cada cuarto deberá informar a las personas el aviso de evacuar la edificación.	-	-	Simulador de evacuación distribuido
	Mover agente de habitación	Cambia de cuarto a la persona	Id_Persona emisora	-	Rol 4: Habitación

Tabla 4. Eventos por Rol

4.2.2.2 Identificación de Agentes

En esta etapa se busca agrupar uno o más roles en un espacio de ejecución denominado agente, el cual se responsabiliza de los eventos asociados previamente a cada rol, para luego realizar con ellos un análisis de despliegue, caracterizando el ambiente real en que los agentes estarán ubicados y operando para poder cumplir con el objetivo de que todas las personas evacuen la edificación [39].

Teniendo en cuenta los agentes identificados en SIMPCE (*Rescatista, Escapista, Habitación*), los cuales han sido especificados en *Sección 2.2*, nace un nuevo agente llamado el *Controlador de cuartos* quien tiene como objetivo principal garantizar la correcta gestión del

agente persona cuando este desee realizar un cambio de cuarto, es decir si un agente rescatista alcanza la puerta del cuarto 1 la cual comunica al cuarto 2, el agente controlador de cuartos mueve este agente al cuarto 2 para que sea reconocido el agente cuarto con quien ahora el rescatista deberá interactuar. Además, este agente controlador es el único que conoce el estado real de la evacuación, pues sabe cuántas personas hay en cada cuarto y es quien puede dar por finalizada la simulación de evacuación.

En la siguiente tabla se muestra la relación entre agentes y roles:

Agente	Rol
Agente Escapista	Rol 2: Escapista
Agente Rescatista	Rol 3: Rescatista
Agente Habitación	Rol 4: Habitación
Agente Controlador Cuartos	Rol 5: Conjunto de cuartos - Piso

Tabla 5. Agente por rol

En cuanto al esquema de comunicación de los agentes, se basó en el protocolo de interacción en donde existe un coordinador, quien es el único encargado de recibir los mensajes para el grupo y luego distribuirlos garantizando el ordenamiento total en la entrega. Por lo tanto, el agente cuarto es el coordinador de todas las interacciones físicas, visuales y verbales entre el grupo de agentes *Persona* que se encuentren dentro de sus límites. También el agente *Controlador de cuartos* es otro coordinador del grupo de agentes *Cuarto* garantizando el correcto movimiento de agentes entre cuartos y la finalización de la evacuación como se nombró anteriormente [20, 39].

4.2.2.3 Modelo de Comportamiento

En la siguiente etapa, se definieron los comportamientos con los que cuenta cada agente, y se especifica cómo es la interacción de todos los eventos identificados (4.2.2.1 *Definición de eventos por rol*), y cómo se asocian a los comportamientos por agente en un modelo de comportamiento dando luego una descripción para cada uno de ellos.

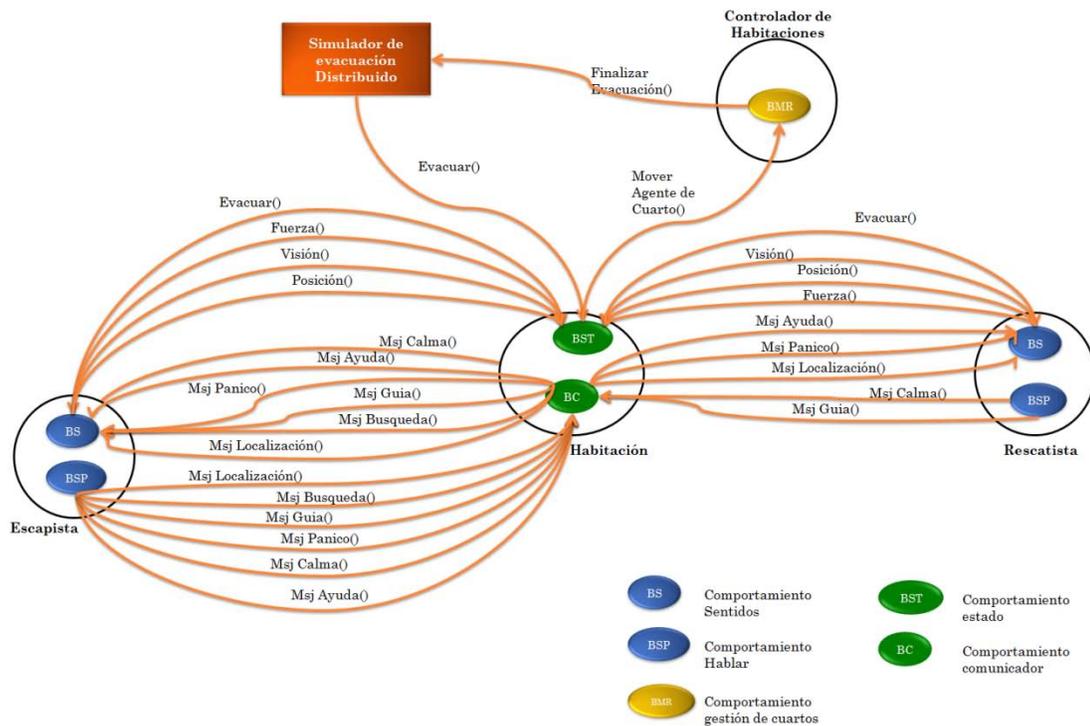


Figura 1. Modelo de Comportamiento

4.2.2.3.1 Comportamientos agente Cuarto

4.2.2.3.1.1 Comportamiento estado de evacuación:

- Es el encargado de avisar a los agentes escapistas y agentes rescatistas que deben evacuar del cuarto en donde se encuentran.
- Avisa al agente controlador de los cuartos cuando un agente persona (escapista, rescatista) debe cambiarse de cuarto.
- Devuelve la posición en que se encuentra el agente persona cuando él la solicite.
- Devuelve el número de agentes en el rango de visión de un agente persona cuando él la solicite.

4.2.2.3.1.2 Comportamiento Comunicador:

- Transmite mensajes de calma, ayuda, guía, y búsqueda al agente escapista, los cuales pueden provenir tanto de un agente rescatista como de un escapista.
- Transmite mensajes de pánico a escapistas con bajo conocimiento del sitio lo cuales provienen de otro escapista.
- Transmite mensajes de localización para el escapista o rescatista que se encuentren buscando al agente escapista emisor del mensaje.

4.2.2.3.2 Comportamientos agente Escapista:

4.2.2.3.2.1 Comportamiento - sentidos:

- Es el encargado de escuchar los mensajes de calma, ayuda, pánico, guía, búsqueda o localización, si son de su interés, es decir dependiendo de las características propias del agente escapista como el nivel de conocimiento del sitio, si tiene personas dependientes, o si se encuentra en pánico, el decidirá si hace caso omiso al mensaje o lo escucha.
- Le pregunta al agente cuarto por la posición actual en donde se encuentra, y por el número de personas que hay en su rango de visión.
- Escucha el mensaje evacuar proveniente del cuarto en donde se encuentre.

4.2.2.3.2.2 Comportamiento Hablar:

- Transmite los mensajes de localización, búsqueda, guía, pánico, calma o ayuda, a los demás agentes por medio del agente cuarto.

4.2.2.3.3 Comportamientos agente Rescatista:

4.2.2.3.3.1 Comportamiento - sentidos:

- Escucha mensajes de ayuda, pánico o localización provenientes de agentes escapistas por medio de el cuarto.
- Al igual que el agente escapista le pregunta al agente cuarto por la posición actual en donde se encuentra, y por el número de personas que hay en su rango de visión.
- Escucha el mensaje evacuar proveniente del cuarto en donde se encuentre.

4.2.2.3.3.2 Comportamiento Hablar:

- Transmite los mensajes de calma o guía a los agentes escapistas por medio del agente cuarto.

4.2.2.3.4 Comportamientos agente Controlador de Cuartos:

4.2.2.3.4.1 Comportamiento Administrador de cuartos:

- Se encarga de mover al agente persona de un cuarto a otro cuando sea necesario.
- Conoce el estado total de la evacuación, por lo tanto es quien realmente sabe cuando la evacuación a terminado para dar por finalizada la sesión.

4.2.3 Despliegue de agentes

Los sistemas multiagentes por su naturaleza cuentan con componentes independientes los cuales se pueden ejecutar en paralelo, por lo tanto realizar una simulación bajo un ambiente distribuido haciendo uso de este paradigma resulta de gran utilidad y más eficiente que en un ambiente monolítico [20]. Para poder afirmar lo anterior, se realizó un análisis y un diseño de despliegue, el cual se encargó de decir cómo se debía dividir el sistema y por qué se debía dividir así, debido a que un punto interesante a tener en cuenta en una simulación distribuida es aliviar el tráfico en la red reduciendo o eliminando la transferencia de datos innecesarios durante la simulación [29].

4.2.3.1 Análisis de despliegue

Para esta etapa se realizó un análisis de cómo se dividirían los agentes por contenedores BESA, es decir cuales agentes inicialmente empezarían la simulación en un determinado contenedor, y cómo sería el movimiento de los agentes en todo el sistema. Para esto se tuvo en cuenta la visión que tienen los arboles BSP (*Binary Space Partitioning*) [40], y poder subdividir el sistema global en subsistemas más pequeños para poderlos procesar sobre una red de computadores y calcular la solución del problema procesándose concurrentemente sobre diferentes máquinas [15].

BSP [40] busca particionar el espacio o datos de entrada del problema entre dos sub espacios, luego cada sub espacio es particionado recursivamente hasta que cada sub problema contiene una fracción trivial del problema global [41]. Así, el siguiente paso fue encontrar hasta qué nivel se subdividiría la evacuación encontrando la complejidad de partición y poder contar con problemas más triviales para cada contenedor de agentes.

Debido a que se cuenta con un agente *Habitación* el cual se encarga de la administración y comunicación de cada persona en ella, se decidió que la complejidad de partición seria hasta

dividir la edificación por cuartos siendo estos las hojas del árbol; de este modo cada contenedor BESA estará compuesto por los agentes *rescatistas*, *escapistas*, que inicialmente se encuentren en el cuarto y el agente *habitación*. Adicionalmente existirá otro contenedor BESA, quien contendrá al agente *Controlador de Cuartos*.

De esta forma, se deja independientemente a cada cuarto disminuyendo la comunicación entre contenedores y minimizando los cuellos de botella siendo uno de los principales factores a tener en cuenta en una simulación distribuida, debido a que únicamente existirá tráfico de datos entre contenedores. El agente cuarto envía un mensaje al controlador de cuartos avisándole que cambie al cuarto correcto a la persona que salió debido a que él es el único agente que conoce la totalidad del piso y la totalidad del estado de cada cuarto.

A continuación un modelo del nivel del sistema planteado explicado anteriormente:

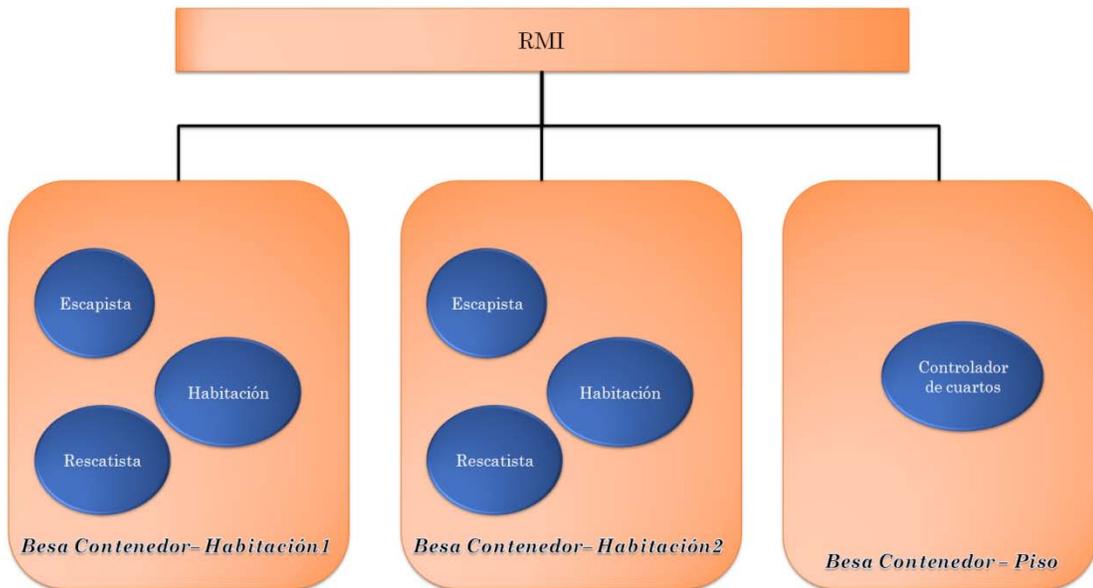


Figura 2. Modelo del Nivel del Sistema

4.2.3.2 Diseño de despliegue

Un punto importante que se debe tener en cuenta a la hora de realizar el diseño del despliegue de los agentes, es buscar reducir la comunicación entre los sitios o máquinas sobre las cuales se ejecutará la simulación [39]. Para esto se ubicaron a los agentes que se comunican

constantemente en un mismo sitio, estos son agente *Escapista*, *Rescatista*, y *Cuarto*, pertenecientes al contenedor Cuarto, ya que la interacción que realizan es considerablemente alta como se observó en el modelo de comportamiento (Sección 4.2.2.3).

Por lo tanto, se propuso el siguiente diagrama de despliegue:

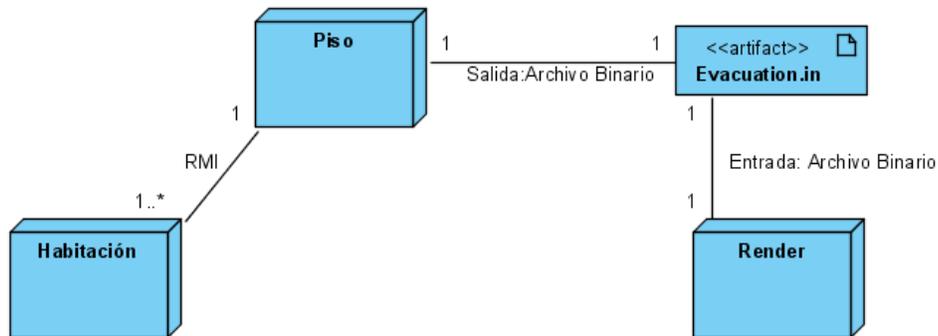


Figura 3. Diagrama de Despliegue

El simulador fue desarrollado pensando en la escalabilidad del sistema, por lo tanto es posible utilizar un sitio o máquina por contenedor Cuarto, el cual tendrá como objetivo principal evacuar a las personas que se encuentren en él sin tener conocimiento global del piso. A su vez, se debe ejecutar el contenedor piso, quien contiene al agente controlador de cuartos, en otro sitio de despliegue proporcionando la comunicación entre los diferentes cuartos existentes en la habitación.

Al finalizar la evacuación el agente controlador de cuartos tiene pleno conocimiento de la totalidad de la simulación, para almacenarla en un archivo binario *Evacuacion.in* y poder ser ejecutada por algún otro programa que muestre gráficamente la simulación, separando de esta forma por completo la parte gráfica de la parte lógica del modelo, generando así gran impacto sobre el tiempo de simulación requerido para generar el compilado total de la evacuación en el archivo binario.

Se desarrolló un interpretador para este archivo binario, el cual se encarga de ilustrar la simulación utilizando jME (Java Monkey Engine) [42], un motor gráfico para desarrollar aplicaciones en 3D escrito en java.

V – VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO

Para realizar la validación del simulador se realizaron dos tipos de ejercicios diferentes, uno para poder identificar la mejora en cuanto al rendimiento de una simulación con gran número de agentes sobre un ambiente distribuido, a una simulación monolítica. Y segundo, se comparó con la evacuación real utilizada por simpe 1, para comprobar la veracidad del simulador, al igual que la diferencia principal referente a la reducción del tiempo de ejecución de la simulación. Partiendo de estos ejercicios se generaron indicadores para poder comparar el simulador y demostrar el realismo.

Es importante aclarar que el *tiempo de ejecución* es aquel que se toma para medir el rendimiento del simulador, a diferencia del *tiempo de simulación real* el cual va estrictamente ligado a las condiciones de la habitación y cualidades de las personas en el. A continuación se presentan los casos expuestos:

5.1 Rendimiento de la simulación

Con el fin de validar que realmente las simulaciones distribuidas ayudan significativamente a decrementar su tiempo de ejecución, se realizaron diferentes pruebas variando el número de agentes, y el número de máquinas sobre un mismo lugar. En primer lugar, se tomó un espacio conformado por un piso de ocho habitaciones cuya distribución fue tomada de forma arbitraria. En la simulación de dicho piso, se incorporó una cantidad variable e incremental de personas, y para cada cantidad de personas, se incrementó el número de procesadores sobre los cuales se realizaba la simulación.

Cada una de las combinaciones anteriores se realizó tres veces con el fin de verificar la varianza del experimento. En la Tabla 6 se observa el promedio de las ejecuciones.

Estas pruebas fueron realizadas con equipos de las siguientes características:

PC Lenovo, Procesador intel core 2 duo 2.1GHz, 2 Gb Ram, y 250Gb disco duro.

# Personas	# Máquinas			
	1	2	3	4
1	3,41	5,92	4,60	6,68
10	5,20	8,33	5,61	4,46
100	30,06	36,36	26,52	19,78
200	81,77	66,33	53,96	45,03
400	168,08	133,01	114,95	91,69
800	411,14	326,70	285,67	225,61
1600	1328,56	995,22	773,93	619,21

Tabla 6. Promedio del tiempo (en segundos) que tarda cada simulación

5.1.1 Normalización de los datos

El proceso de normalizar los datos es usualmente realizado para quitar el error estadístico que pueda existir en los datos medidos, para esto existen varias pruebas que se aplican a dicho conjunto de datos para determinar su similitud con una distribución normal [43]. En este caso se realizó una prueba Jarque – Bera[43] para comprobar que los datos tomados siguen una distribución normal, para ello se tomaron dos hipótesis:

Ho: Los datos siguen una distribución normal.

Ha: Los datos no siguen una distribución normal.

Los pasos que se realizaron fueron los siguientes:

1. Encontrar el coeficiente de asimetría.
2. Encontrar una desviación estándar muestral.
3. Encontrar el coeficiente de curtosis.
4. Encontrar el valor de Jarque-Bera.
5. Tomar la decisión teniendo en cuenta el valor crítico.

Para la prueba se tomó un nivel de significancia del 95%, debido la interferencia que se presenta en el procesador cuando se realizó la toma de tiempos de ejecución de las simulaciones.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos con dicha prueba:

Número de personas	Valor de Jarque-Bera	Valor Critico	Decisión
1	0,116373305	5,991	No se Rechaza
10	1,83969885	5,991	No se Rechaza
100	0,03491299	5,991	No se Rechaza
200	0,24299153	5,991	No se Rechaza
400	0,31122359	5,991	No se Rechaza
800	0,20121587	5,991	No se Rechaza
1600	0.25012541	5.991	No se Rechaza

Tabla 7. Resultados prueba Jarque-Bera

Como se ve en la tabla anterior los datos siguen una distribución normal, no rechazando la hipótesis H_0 .

5.2 Pruebas rendimiento y escalabilidad

A continuación se presentaran los resultados de tiempo de ejecución vs. Número de personas, por conjunto de máquinas:

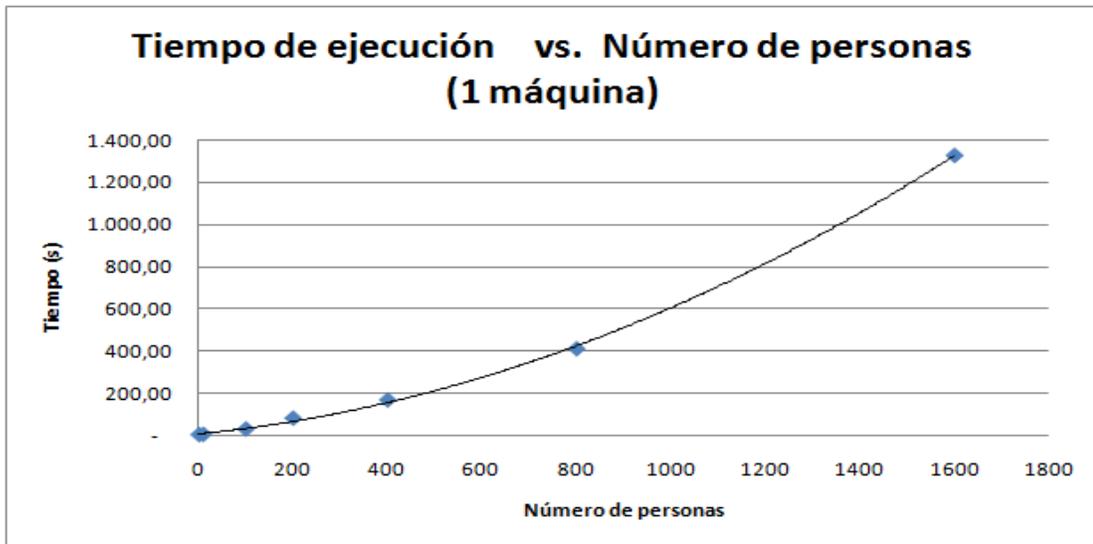


Figura 4. Tiempo de ejecución vs. Número de personas (1 máquina)

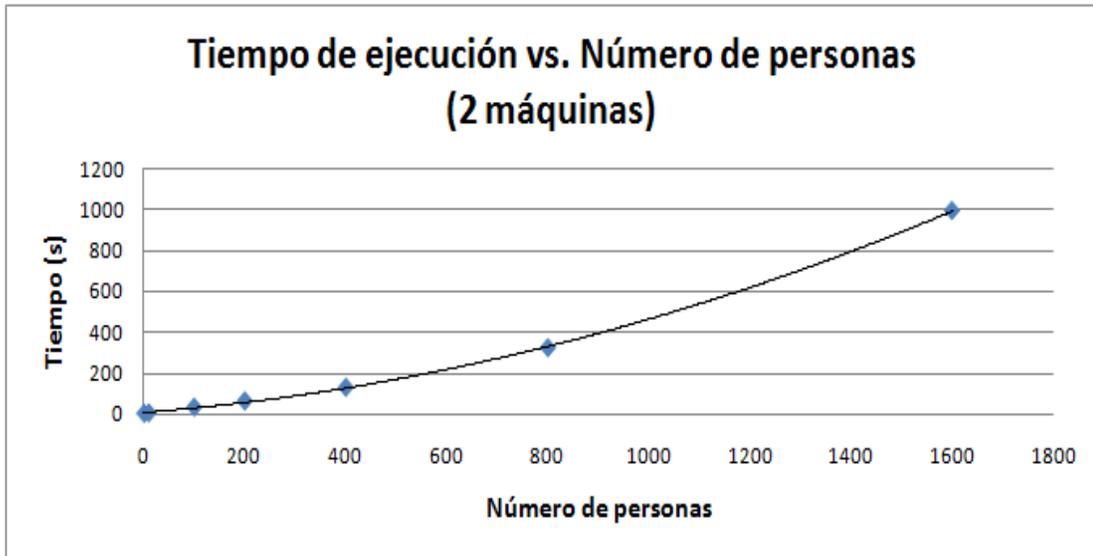


Figura 5. Tiempo de ejecución vs. Número de personas (2 máquinas)

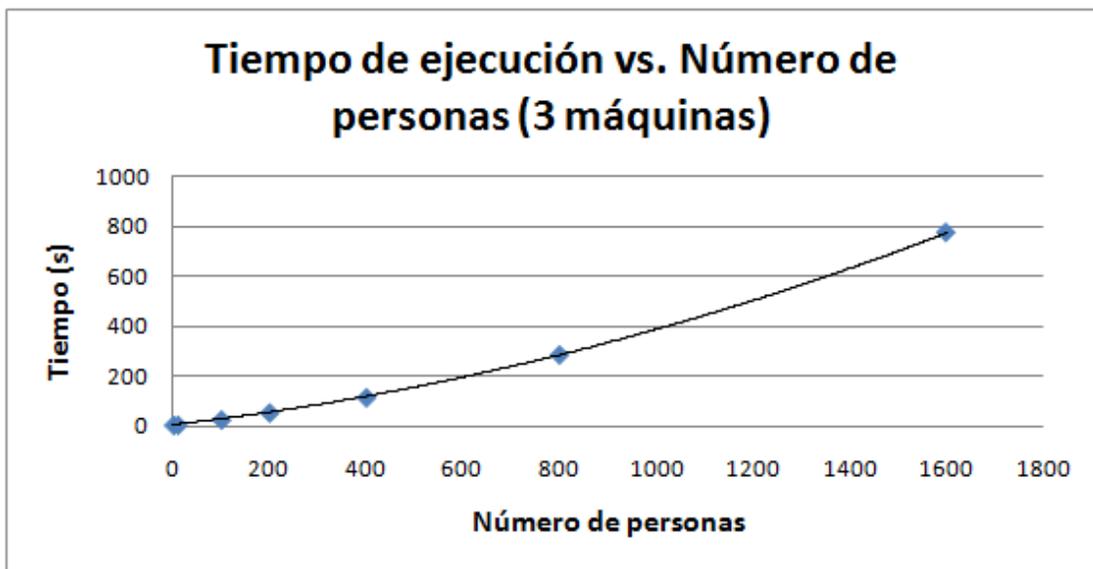


Figura 6. Tiempo de ejecución vs. Número de personas (3 máquinas)

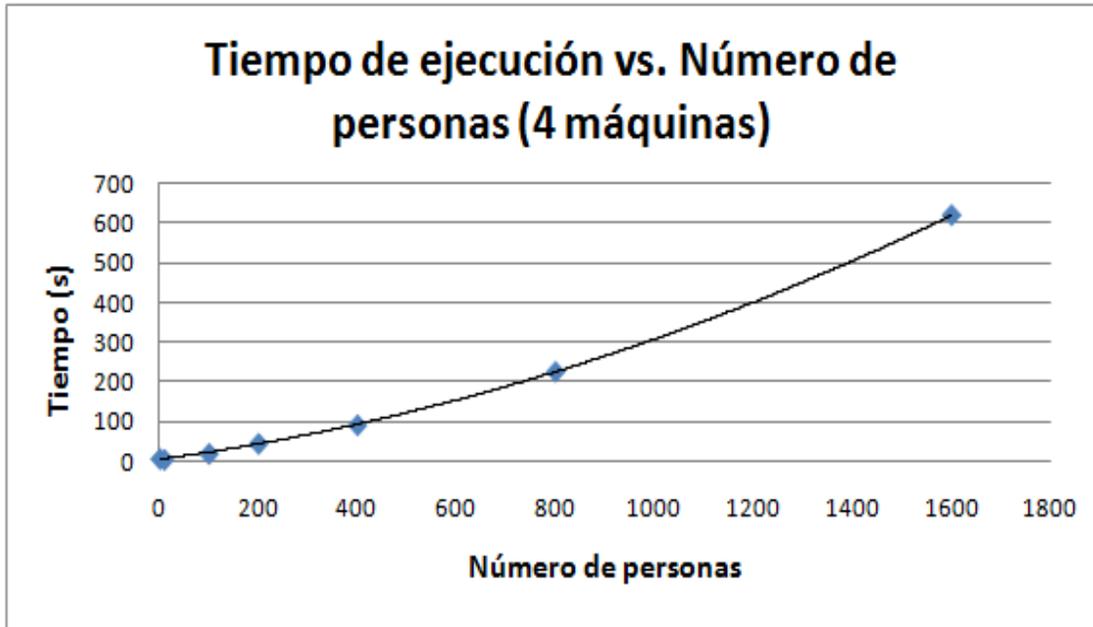


Figura 7. Tiempo de ejecución vs. Número de personas (4 máquinas)

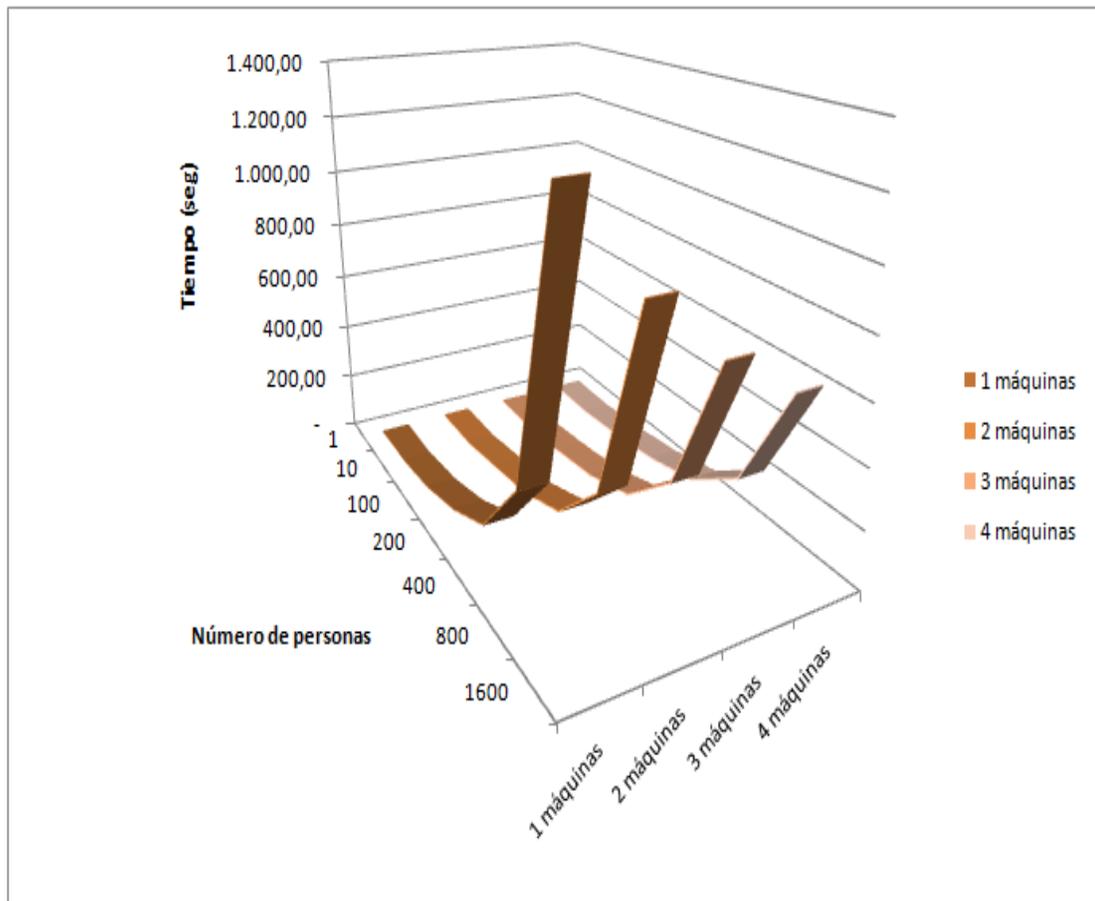


Figura 8. Agrupación Tiempo de ejecución vs. Número de personas

En la última gráfica, la cual reúne el tiempo de ejecución vs. Número de personas para todos los conjuntos de máquinas, se puede observar que el comportamiento de las curvas es similar, pero la tasa de crecimiento es más rápida en cuanto al tiempo de ejecución si se tiene menos máquinas para la simulación. Lo cual, demuestra que entre ejecutar una simulación con un gran número de personas sobre un ambiente distribuido es más eficiente que ejecutarlo sobre un ambiente monolítico.

5.3 Comparación situación real

Para comprobar la veracidad del simulador se tomo la simulación realizada por Taeyon Kim [6, 44] en una plaza de mercado en Corea utilizando el simulador Simulex [45]. Para a su vez mostrar la reducción del tiempo de ejecución comparándolo con el tiempo de ejecución que se tomo el simulador simpce 1 en este mismo escenario.

Se realizaron varias ejecuciones sobre el mismo escenario, variando el ambiente entre monolítico y distribuido. A continuación, un resumen de las pruebas realizadas, comparándolo tanto con el simulador Simulex [45] y simpce 1. El ejercicio fue realizado con un número de 300 agentes, en los 3 casos, con una diferencia en el tipo de personas, en el caso de Simulex y Simpce 2 se utilizaron mujeres y hombres con conocimiento del sitio variados y condiciones físicas aleatorias dentro del promedio, al contrario de Simpce 1, pues la simulación fue realizada por únicamente hombres con 100% de conocimiento del sitio.

Simulador	# Máquinas	Promedio Tiempo ejecución (seg)	Promedio Tiempo de simulación real (seg)
Simulex	1	Desconocido	90
Simpce 1	1	96,56	96,56
Simpce 2	1	50,4	94,25
	2	43,5	97,3
	3	36,14	91,7
	4	30,5	95,45

Tabla 8. Promedios resultado de la comparación

Como se muestra en la tabla anterior, se ve que el tiempo de ejecución se reduce a medida que el número de maquinas aumenta. Y si se compara con respecto a simpce 1, el tiempo de ejecución bajo ambiente monolítico sigue siendo menor en simpce 2, debido a que el simulador es totalmente independiente del visualizador.

A continuación se puede observar el comportamiento gráficamente:

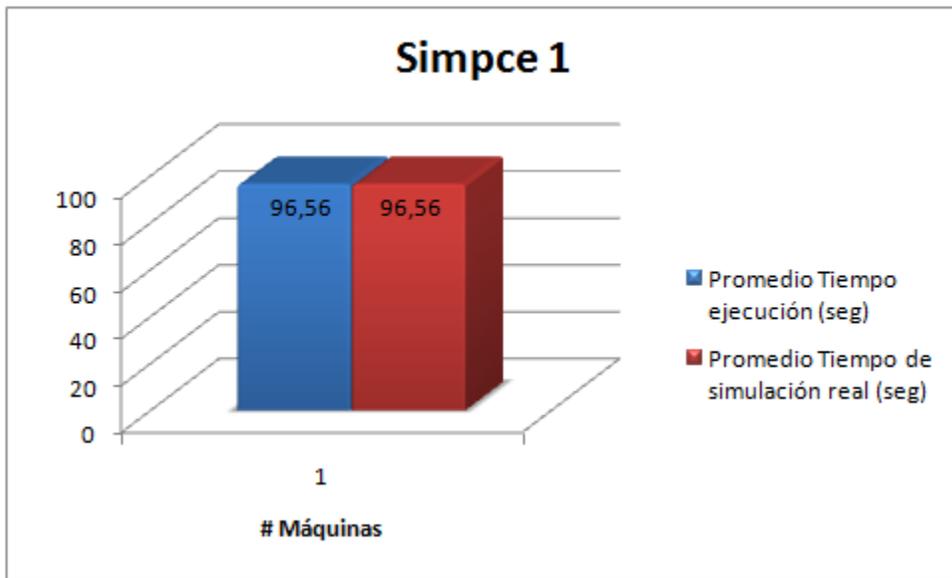


Figura 9. Comparación tiempos simulador simpce 1

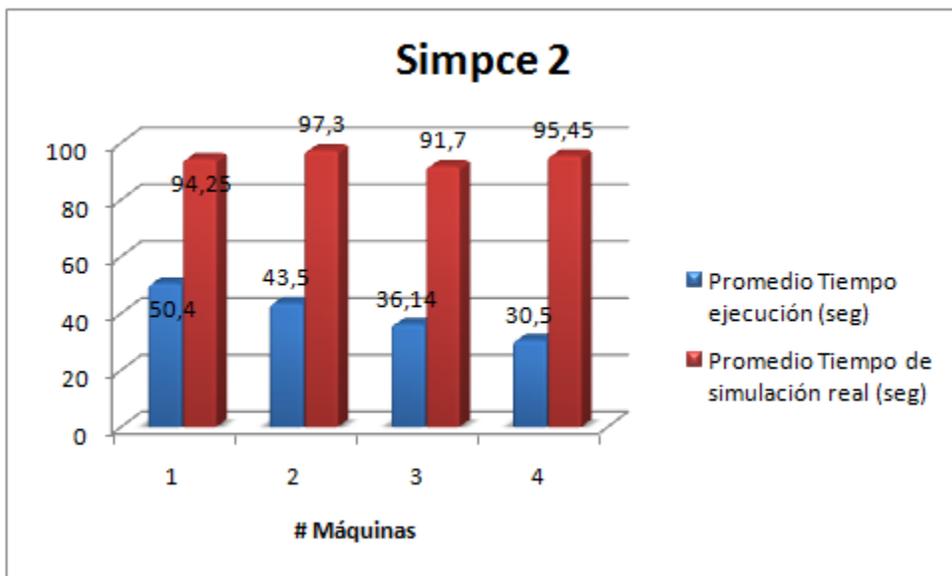


Figura 10. Comparación tiempos simulador simpce 2

Como se observa en la Figura 9 los tiempos son exactamente iguales, lo cual no es coherente a la realidad debido a que si se ejecutara una simulación con mayor cantidad de personas posiblemente el tiempo de ejecución es mayor, como se observa en Tabla 6. Promedio del tiempo (en segundos) que tarda cada simulación Pero el tiempo de simulación real tan solo aumentaría unos cuantos segundos. En la Figura 10 al aumentar el número de maquinas el tiempo de ejecución disminuye mientras que el tiempo de simulación real se mantiene constante. Debido a que el simulador no estaba integrado a su parte grafica se logra realizar una disminución de casi el 50% del tiempo en una sola máquina si comparamos simpce 1 con simpce 2.

A continuación se muestra el resumen realizado después de ejecutar diferentes pruebas con el mismo caso real del mercado de Corea, pero variando las condiciones de las personas en Simpce 2 para demostrar el realismo del prototipo:

Genero	Nivel de Conocimiento del sitio	Rescatista?	Promedio Tiempo ejecución (seg)	Promedio Tiempo de simulación real (seg)
Hombre	Alto (100%)	NO	40,3	63,2
	Medio (33% - 66%)	NO	51,1	82,3
	Bajo (0% - 33%)	NO	55,6	116,5
Mujer	Alto (100%)	NO	40,6	66,8
	Medio (33% - 66%)	NO	50,3	84,5
	Bajo (0% - 33%)	NO	59,7	124,3
Hombre	Alto (100%)	SI	42,6	64,3
	Medio (33% - 66%)	SI	53,2	78,6
	Bajo (0% - 33%)	SI	60,3	110,6
Mujer	Alto (100%)	SI	41,6	64,3
	Medio (33% - 66%)	SI	52,9	78,6
	Bajo (0% - 33%)	SI	61,8	119,6
Hoombre y Mujer	Alto , Medio y Bajo	SI	50,4	91,7

Tabla 9. Comparación de resultados variando las condiciones de la simulación

Al analizar el valor en color Naranja de la Tabla 9, con el valor arrojado por simpce 1 en la Tabla 8 con las mismas condiciones de solo hombres, con un nivel de conocimiento del sitio del 100% y sin rescatistas, se ven reflejados en la siguiente grafica:

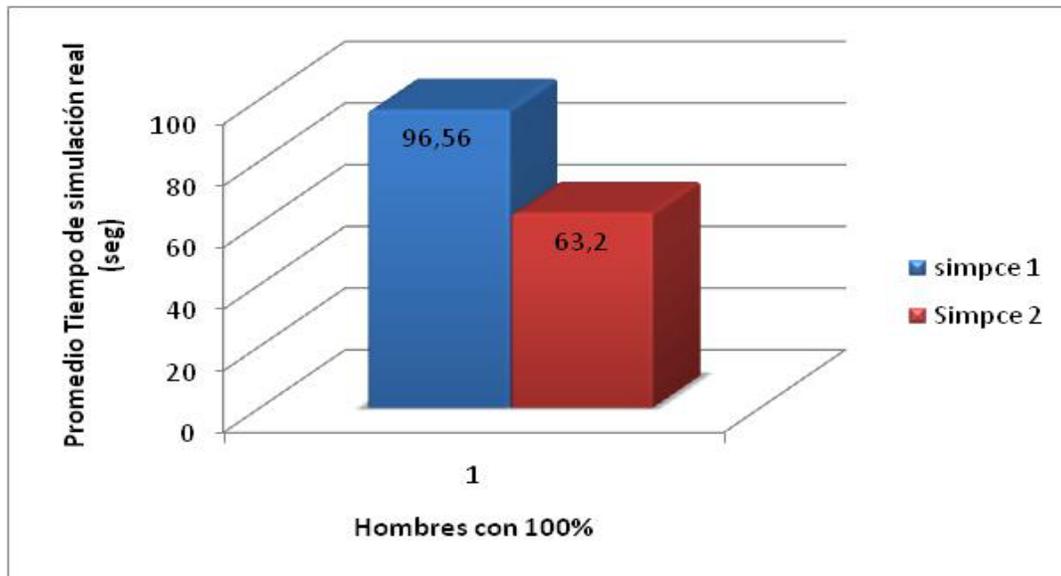


Figura 11. Comparación Tiempo simulación real Simpce 1 y Simpce 2 en igualdad de condiciones

Cómo se observa en la grafica, el tiempo es menor en Simpce 2, lo cual es coherente con la realidad, debido a que entre mayor conocimiento tengan las personas (en este caso Hombres, que corren más rápido) de la habitación en donde se encuentren, tomaran menos tiempo en salir, al igual que se encuentran sin ser dependientes de alguien.

Además, la variación del nivel de conocimiento del sitio en la tabla 9, muestra un incremento del tiempo de simulación real entre menor sea el porcentaje de conocimiento, lo cual también es coherente a la realidad. Esto se presenta tanto en hombres como en mujeres. De igual forma, influye la aparición de los rescatistas los cuales ayudan a disminuir el tiempo de evacuación en cualquier caso.

Con los resultados anteriores se puede concluir que el realismo del simulador simpce 2 mejoro al aplicar todas las características definidas por el modelo de agentes, obteniendo resultados más coherentes a la realidad.

VI- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Conclusiones

- Lograr separar por completo la parte gráfica, de la parte de la simulación supera el principal problema con el que contaba SIMPCE, ya que el cuello de botella se centraba en la interfaz gráfica realizada con el framework Java Monkey Engine, pues el consumo de recursos que se requerían para simulaciones a gran escala era demasiado. Con el nuevo simulador se logran ejecutar hasta 1600 personas en un espacio cerrado, sin embargo, el render o gráficator realizado para este trabajo de grado no es óptimo en la utilización de recursos con simulaciones que cuenten con más de 200 personas, proponiendo así un trabajo futuro para este problema (*Ver Sección VI – Trabajos Futuros*).
- Se logró comprobar que las simulaciones distribuidas para evacuación de personas, logran disminuir el tiempo de ejecución, dividiendo una simulación en el número de cuartos de la edificación y ejecutando cada una de estas subdivisiones en una máquina como se muestra en la sección de resultados.
- Se separo completamente el tiempo de ejecución real de una evacuación, del tiempo de ejecución de la simulación. Diferenciando de esta manera el impacto que tiene una simulación con el mismo número de personas, sobre el mismo escenario, pero con diferente número de maquinas por ejecución. Mostrando una importante reducción en el tiempo, inclusive cuando es monolítico.
- Gracias al planteamiento físico realizado con el fin de obtener el tiempo real que se demoraría en evacuar un grupo de gente sobre una edificación, fue la parte fundamental para poder dividir el simulador en componente lógico, y componente gráficator, los cuales logran interactuar de forma independiente, a excepción de el render que lo único que necesita es un archivo de configuración generado por el módulo lógico del simulador.
- Se espera que con los resultados de este trabajo sean de gran utilidad para organismos de socorro como una herramienta para planeación en caso de emergencia o para analizar los escenarios de evacuación en caso de desastre y también como soporte para un estudio futuro en esta área de exploración.

Trabajos Futuros

En el futuro se podrían realizar trabajos los cuales servirían para seguir complementando el simulador y así poder llegar a un producto final.

Entre los distintos tipos de trabajo podrían incluirse:

1. Diferentes obstáculos en medio de la simulación, es decir, la repentina aparición de fuego o la caída de algún muro que obligue a pensar en una ruta o fuente de información diferente para así cambiar el rumbo de la evacuación. Con esto se lograría ampliar la simulación, ya que es una variable que puede aparecer en cualquier momento e influir de manera significativa, no solo en el recorrido de evacuación, sino también en la percepción de las personas que se encuentren en la simulación.
2. Poder simular el ambiente normal de las personas durante un lapso de tiempo establecido antes de que se lance la alarma de emergencia, de tal forma que los escapistas puedan aprender las diferentes rutas sin necesidad de que el conocimiento de estas sea a priori.
3. Se podría tener en cuenta un conocimiento más profundo en cuanto a los procesos psicológicos de las personas, ya que podrían incluirse problemas en la sensación y percepción de algunas personas en particular. Esto serviría como variables importantes que pueden llegar a influir de una manera significativa a la hora de realizar una evacuación. De igual modo sería interesante permitir que las personas reconozcan, en situación de emergencia, a otras personas con las cuales puede crearse cierto tipo de dependencia en medio de la simulación.
4. Usualmente las simulaciones se ejecutan con un conjunto de datos estático, se podrían llegar a obtener mejores resultados si los agentes pudieran tener datos dinámicos como por ejemplo de otras simulaciones [27].
5. Optimizar el gráficator de la simulación que ha sido realizado con el framework java monjey engine JME, ya sea realizándolo desde cero apoyándose con otro framework, u optimizando lo que actualmente existe.

VI –POST-MORTEM

La metodología que se realizó para el desarrollo de este proyecto de grado fue la siguiente:

Fase Metodológica 1

- Se analizó SIMPCE recopilando en un documento el estado actual para así darle continuidad al trabajo futuro propuesto.

Metodología de Investigación Descriptiva.

Actividades:

- Se entendió el modelo que ha sido desarrollado en el trabajo de grado SIMPCE.
- Se realizó retroalimentación con los autores del trabajo de grado en busca de posibles sugerencias o resolver interrogantes surgidos.
- Se generó un recopilado del estado actual.

Fase Metodológica 2

- Se implementaron todas las características del modelo psicológico en un nuevo prototipo.

Metodología de desarrollo con prototipación

Actividades:

- Se evaluó lo que ya se encontraba implementado tomando la decisión de implementar todo el prototipo desde el principio.
- Se hizo un *diseño rápido* el cual se centraba únicamente en el modelo psicológico.
- Se implementó el prototipo.

Fase Metodológica 3

- Se analizó y diseñó el despliegue al modelo de agentes en un ambiente distribuido.
- Metodología de Investigación Análisis y Síntesis.*

Actividades:

- Modelo de Agentes :
 - Se realizó una identificación de roles, teniendo en cuenta la jerarquía existente entre ellos, siguiendo la metodología AOPOA.
 - Se realizó una definición de eventos por rol.

- Se identificaron los agentes del sistema relacionándolos a uno de los roles previamente identificados.
- Se realizó el modelo de comportamiento entre agentes.
- Análisis de despliegue:
 - Se realizó un modelo del nivel del sistema.
- Diseño de despliegue:
 - Establecer la ubicación de cada instancia.
 - Evaluar si es necesario que existan instancias de agentes que se comunican entre sí con el fin de respetar las reglas de interacción entre roles.
 - Se realizó un diagrama de despliegue del sistema.
- Presentación de resultados:
 - Se compilaron los resultados en una sola máquina.

Fase Metodológica 4

- Se validó el modelo de despliegue junto con su presentación de datos en la implementación de una nueva versión del prototipo bajo un ambiente distribuido.

Metodología de desarrollo con prototipación

Actividades:

- Se definieron los requerimientos del prototipo.
- Se hizo un *diseño rápido* escalando la versión dos del prototipo en un ambiente distribuido.
- Se implementó la versión final del prototipo.
- Se realizó la validación por medio de un protocolo experimental evaluando que efectos tiene la escalabilidad.

Sin embargo, en la fase Metodológica dos hubieron cambios en la implementación de las actividades, debido a que el desarrollo del prototipo se realizó desde completamente desde el principio, pues durante la evaluación del prototipo SIMPCE, se encontraron problemas con la toma de tiempos reales de simulación.

Durante la fase metodológica tres, para poder realizar el diseño de despliegue, se siguió la metodología AOPOA para poder generar un modelo de comportamiento de agentes, del cual se parte para realizar el análisis y diseño de despliegue.

VII - REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

Referencias

- [1] Hopkins Keith and Beard Mary, "The Colosseum," *Cambridge, MA: Harvard University Press. ISBN 0-674-01895-8*, 2005.
- [2] S. Geary, *Manual para planificar la administración de emergencias*: McGraw-Hill, 1998.
- [3] Cuero and B. R., *Guía práctica de Simulacros de Evacuación*: Centro Nacional de Prevención de Desastres, S. G, 1995.
- [4] D. McGrath, *et al.*, "A simple distributed simulation architecture for emergency response exercises," in *Distributed Simulation and Real-Time Applications, 2005. DS-RT 2005 Proceedings. Ninth IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 221-226.
- [5] Fondo de Prevención y Atención de Emergencias. (2008, Agosto 2010). *Cartilla de prevención de terremotos (Alcaldía Mayor de Bogotá, Terremotos ed.)*. Available: <http://www.aiph.com.co/ftpespe/carterremoto.pdf>
- [6] Andrés Camilo Galvis Rodríguez and Juan Felipe González Gómez, "Simulador de movilidad de personas en espacios cerrados," Ingeniero de Sistemas investigación, Ingeniería de Sistemas, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2009.
- [7] T. I. E. M. S. TIEMS. (2010, The International Emergency Management Society Available: <http://www.tiems.org/index.php/about-tiems/mission-and-aim>
- [8] D. Pawlaszczyk and S. Strassburger, "Scalability in distributed simulations of agent-based models," in *Winter Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2009*, 2009, pp. 1189-1200.
- [9] N. E. T. Nguy\1Ecn, *Agent and multi-agent systems : technologies and applications : second KES international symposium, KES-AMSTA 2008 : Inch\02BBon, Korea, March 26-28, 2008 : proceedings*. Berlin ; New York: Springer, 2008.
- [10] P. F. Riley and G. F. Riley, "SPADES - a distributed agent simulation environment with software-in-the-loop execution," in *Simulation Conference, 2003. Proceedings of the 2003 Winter*, 2003, pp. 817-825 Vol.1.
- [11] J. Banks, *Discrete-event system simulation*, 4th ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, 2005.
- [12] B. COSS *Simulación un Enfoque Práctico*. Mexico: Limusa, 1991.

- [13] R. SHANNON, "Simulación de sistemas", ed. México Trillas, 1988.
- [14] G. FHISMAN, *Conceptos y Métodos en Simulación Digital de Eventos Discretos*. México: Limusa, 1986.
- [15] W. Jian, *et al.*, "Agent-based distributed simulation," in *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*, 2006, p. 6 pp.
- [16] H. Kobayashi, *et al.*, "A multi-agent evacuation simulator to design safe cities for high quality of life with computer clustering," in *SICE, 2007 Annual Conference*, 2007, pp. 3043-3046.
- [17] R. Tobias and C. Hofmann, "Evaluation of free java-libraries for social-scientific agent based simulation," *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 7, 2004.
- [18] O. Obst and M. Rollmann, "Spark – A Generic Simulator for Physical Multi-agent Simulations," in *Multiagent System Technologies*. vol. 3187, G. Lindemann, *et al.*, Eds., ed: Springer Berlin / Heidelberg, 2004, pp. 153-159.
- [19] J. Baltes and SpringerLink (Online service). (2010). *RoboCup 2009 Robot Soccer World Cup XIII*. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-11876-0>
- [20] Enrique Gonzales and C. Bustacara, *Desarrollo de aplicaciones basadas en sistemas multiagentes*. Bogotá: Editorial Pontificia Universidad Javeriana, Editores Academicos, 2007.
- [21] B. Yang, *et al.*, "A Multi-agent and GIS Based Simulation for Emergency Evacuation in Park and Public Square," in *Computational Intelligence and Security, 2009. CIS '09. International Conference on*, 2009, pp. 211-216.
- [22] Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. and Secretaria de Gobierno. (2010, 1 Octubre). *Dirección de Prevención y Atención de Emergencias (DPAE)*. Available: <http://www.fopae.gov.co/portal/page/portal/fopae>
- [23] Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. and Colombia Presidencia de la Republica. (2010, 1 Octubre). *Simulacro Internacional de Emergencias*
Available: <http://simulacroemergenciasbogota.gov.co/>
- [24] M. Court, *et al.*, "A framework for simulating human cognitive behavior and movement when predicting impacts of catastrophic events," presented at the Proceedings of the 36th conference on Winter simulation, Washington, D.C., 2004.

- [25] A. M. Uhrmacher and K. Gugler, "Distributed, parallel simulation of multiple, deliberative agents," in *Parallel and Distributed Simulation, 2000. PADS 2000. Proceedings. Fourteenth Workshop on*, 2000, pp. 101-108.
- [26] D. S. Nussbaum, *et al.*, *Scalability of parallel machines*. Cambridge, Mass.: Microsystems Technology Laboratories, Massachusetts Institute of Technology, 1991.
- [27] L. F. Wilson, *et al.*, "A framework for linking distributed simulations using software agents," *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, pp. 186-200, 2001.
- [28] R. Balakrishnan and K. Ranganathan, *A textbook of graph theory*. New York: Springer, 2000.
- [29] W. Lihua, *et al.*, "Interest management in agent-based distributed simulations," in *Distributed Simulation and Real-Time Applications, 2003. Proceedings. Seventh IEEE International Symposium on*, 2003, pp. 20-27.
- [30] B. Banerjee, *et al.*, "Advancing the Layered Approach to Agent-Based Crowd Simulation," in *Principles of Advanced and Distributed Simulation, 2008. PADS '08. 22nd Workshop on*, 2008, pp. 185-192.
- [31] H. S. Chang, *Simulation-based algorithms for Markov decision processes*. London: Springer, 2007.
- [32] H. Taghaddos, *et al.*, "Distributed agent-based simulation of construction projects with HLA," in *Simulation Conference, 2008. WSC 2008. Winter, 2008*, pp. 2413-2420.
- [33] P. A. Tipler and R. A. Llewellyn, *Modern physics*, 3rd ed. New York: W.H. Freeman, 1999.
- [34] P. A. Tipler and G. Mosca, *Physics for scientists and engineers : extended version*, 5th ed. New York: W.H. Freeman, 2003.
- [35] P. A. Tipler, *Foundations of modern physics*. New York: Worth Publishers, 1969.
- [36] E. Sviestins, *et al.*, "Speed adaptation for a robot walking with a human," presented at the Proceedings of the ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction, Arlington, Virginia, USA, 2007.
- [37] Roymech. (2010, October). *Approximate friction factors, Coefficient of Friction* Available: http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Tribology/co_of_frict.htm
- [38] M. Charles, "Tutorial on agent-based modeling and simulation part 2: how to model with agents," *Proceedings of the 38th conference on Winter simulation*, 2006.

-
- [39] Julián Rodríguez, *et al.*, "The AOPOA Methodology," *Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia*, 2007.
- [40] F. Caccavale, *et al.*, "Visual Tracking of Multiple Objects Using Binary Space Partitioning Trees," in *Robotics Research*. vol. 15, P. Dario and R. Chatila, Eds., ed: Springer Berlin / Heidelberg, 2005, pp. 305-314.
- [41] CSABA D. TÓTH, "Binary Space Partitions: Recent Developments," *MSRI Publications, Combinatorial and Computational Geometry*, vol. Volume 52, 2005.
- [42] J. M. Engine. (2010). *jMonkeyEngine, 3D Game engine*. Available: <http://www.jmonkeyengine.com/>
- [43] Jorge Andres Alvarado Valencia and Juan Jose Obagi Araujo, *Fundamentos de Inferencia Estadística*. Bogotá: Editorial Pontificia Universidad Javeriana, 2008.
- [44] T. Kim. (1991, 2011). *Tae-Yong Kim's home page*. Available: <http://sites.google.com/site/taeyongkimshomepage/home>
- [45] IES, *et al.* (2006, 2011). *Simulex – simulation of occupant evacuation*. Available: <http://simcosm-india.com/pdf/Simulex.PDF>

VIII - ANEXOS

A continuación una lista de anexos al trabajo de grado:

Anexo 1. Propuesta trabajo de grado

Anexo 2. Estado de SIMPCE

Anexo 3. Mapa mental MODELO SIMPCE (Agentes)

Anexo 4. Código Fuente del simulador, módulo Render y módulo Lógica.

Anexo 5. Video de ejemplo de simulaciones utilizando el Render del simulador.

Anexo 6. Análisis estadístico detallado a datos de simulaciones.