



PROYECTO DE GRADO

Presentado ante la ilustre UNIVERSIDAD DE LOS ANDES como requisito parcial para
obtener el Título de INGENIERO DE SISTEMAS

MODELADO Y SIMULACIÓN MEDIANTE SISTEMAS MULTIAGENTE DE LA EVACUACIÓN DE PERSONAS DE EDIFICACIONES DE VARIOS PISOS EN PRESENCIA DE OBSTÁCULOS

Por

Br. José Miguel Molina Rondón

Tutor: Prof. Sebastián Medina

Cotutor: Prof. Hilda Contreras

Abril 2010

©2010 Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela

Modelado y simulación mediante sistemas multiagente de la evacuación de personas de edificaciones de varios pisos en presencia de obstáculos

Br. José Miguel Molina Rondón

Proyecto de Grado — Investigación de Operaciones, 130 páginas
Escuela de Ingeniería de Sistemas, Universidad de Los Andes, 2010

Resumen: Este proyecto muestra el desarrollo de un modelo multiagente que simula un proceso de evacuación de personas en presencia de obstáculos. Se modeló la forma de movimiento y la conexión entre los distintos pisos de un edificio, siendo considerados un conjunto de aspectos importantes, determinantes en el diseño del modelo, tales como: creación de ambientes, generación de situaciones de emergencia, determinación de las variables que caracterizan a los agentes del sistema y el estudio de plataformas que permiten desarrollarlo. Como ejemplo de aplicación se utilizó la torre llamada Ala Oeste del edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, que cuenta con un nivel de elevación de cuatro pisos. Se estudiaron varios escenarios de prueba con los cuales se determina, en primer lugar, que la metodología de sistemas multiagente esta muy bien orientada al modelado y simulación de la evacuación de edificaciones, y en segundo lugar, que en el ejemplo de aplicación los resultados del estudio muestran que los tiempos mínimos de evacuación en un edificio de esas características no puede ser menor a cinco minutos, cualquiera que sea la situación que se presente. Las densidades de ocupación que se alcanzan en algunos lugares durante el proceso de evacuación, indican valores superiores a los permitidos para que haya desplazamiento libre de los ocupantes, llegando a niveles cercanos a 3,5 personas por metro cuadrado, lo cual indica que pudiera en el caso de una evacuación real de esta edificación, haber serios problemas y un riesgo elevado de daño. Para la implementación del modelo se uso como plataforma de desarrollo a GALATEA y su librería gSpaces.

Palabras clave: Agentes, sistemas multiagente, evacuación, modelado, simulación

Índice

Índice de Tablas	vi
Índice de Figuras	vii
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	3
1.2 Definición del problema	5
1.3 Justificación	6
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2 Objetivos específicos	7
1.5 Metodología	7
2 Marco Teórico	9
2.1 Agentes	9
2.1.1 Definición	9
2.1.2 Propiedades y características de los agentes	10
2.1.3 Clasificación de los agentes	12
2.1.4 Arquitecturas de agentes	16
2.1.5 Tipos de ambientes para agentes	19
2.2 Sistemas Multiagente (SMA)	20
2.3 Evacuación de edificios	25
2.3.1 Factores que determinan el proceso de evacuación	25
2.3.2 Comportamiento de los Ocupantes	32

2.3.3	Magnitudes presentes en la ocupación de los recintos y el movimiento de las personas	32
2.3.4	Tiempos de evacuación	33
2.3.5	Términos de evacuación	35
2.4	Tipos de modelos para simular las condiciones de un espacio y la dinámica de sus ocupantes	36
2.5	Modelado y simulación de la evacuación de un edificio usando SMA . .	39
2.5.1	Metodologías y plataformas de desarrollo de SMA	39
2.6	GALATEA	44
2.6.1	Diseño	44
2.6.2	Librería gSpaces	45

3	Modelado y simulación de la evacuación de personas en un edificio de varios pisos	56
3.1	Descripción del sistema	56
3.1.1	Descripción del espacio físico	56
3.1.2	Descripción de los ocupantes	64
3.1.3	Descripción de obstáculos	66
3.1.4	Descripción del ambiente	66
3.2	Simulación multiagente	67
3.2.1	Comportamiento de los agentes dentro del sistema	67
3.2.2	Campos que definen el comportamiento de los agentes y su entorno	69
3.2.3	Cambios en la configuración inicial de los espacios	71
3.2.4	Implementación de las reglas de movimiento	72
3.2.5	Implementación de puertas para conexión entre pisos	79
3.2.6	Asignación del tiempo de simulación	80
3.2.7	Interacción entre los ocupantes	83
3.2.8	Representación gráfica del modelo	83
3.3	Simulación del modelo	84
3.4	Verificación y validación del modelo	85
3.4.1	Verificación	86
3.4.2	Validación	87

4	Descripción y análisis de escenarios	89
4.1	Primer escenario	89
4.2	Segundo escenario	93
4.3	Tercer escenario	95
4.4	Cuarto escenario	99
4.5	Resumen de los resultados	103
5	Conclusiones y recomendaciones	111
	Bibliografía	117
A	Traza de la simulación	121

Índice de Tablas

3.1	Medidas del edificio de la Facultad de Ingeniería	59
3.2	Registro de ocupación estudiantil de la Facultad de Ingeniería	60
3.3	Promedio de ocupación del Ala Oeste	63
3.4	Valores de los parámetros de los nodos Display, Exit y MobileAg	69
3.5	Constructores de algunos espacios del Ala Oeste	71
3.6	Tiempo y velocidad para cada recorrido	82
3.7	Cantidad de ocupantes por ejecución	86
3.8	Salidas del sistema	87
3.9	Tiempos de salida para dos salones del Ala Oeste	87
3.10	Tiempos de salida arrojados por el simulador	88
4.1	Salidas del primer escenario ($V = 2,0 \text{ m/s}$)	90
4.2	Salidas del primer escenario ($V = 1,2 \text{ m/s}$)	90
4.3	Salidas del segundo escenario	94
4.4	Salidas del tercer escenario	97
4.5	Salidas del cuarto escenario	100
4.6	Resultados obtenidos en cada escenario	103

Índice de Figuras

2.1	Representación de la proyección de la figura humana	28
2.2	Espacio formado por dos habitaciones y un área externa	50
2.3	Tomas de la simulación del ejemplo	55
3.1	Modelo visto en planta de la Facultad de Ingeniería	57
3.2	Modelo estructural de la Facultad de Ingeniería	59
3.3	Representación del agente	73
3.4	Representación del ambiente de evacuación	73
3.5	Secuencia de movimiento en un salón mediante la regla “Diferentes” . .	75
3.6	Desplazamiento de ocupantes empleando la regla “PrefPuno”	77
3.7	Puntos de referencia para el movimiento en “PrefPtres”	78
3.8	Puntos de referencia para el movimiento en “PrefPSotano”	79
3.9	Paso de un piso superior a un piso inferior	81
3.10	Llegada de un piso superior a un piso inferior	81
3.11	Representación gráfica del modelo	84
4.1	Nivel de ocupación en los pasillos del Ala Oeste para el primer escenario	91
4.2	Densidad de ocupación en los pasillos del Ala Oeste para el primer es- cenario	92
4.3	Nivel de ocupación en los pasillos del Ala Oeste para el segundo escenario	94
4.4	Densidad de ocupación en los pasillos del Ala Oeste para el segundo escenario	96
4.5	Nivel de ocupación en los pasillos del Ala Oeste para el tercer escenario	98
4.6	Densidad de ocupación en los pasillos del Ala Oeste para el tercer escenario	99
4.7	Nivel de ocupación en los pasillos del Ala Oeste para el cuarto escenario	101

4.8	Densidad de ocupación en los pasillos del Ala Oeste para el cuarto escenario	102
4.9	Ocupación en el pasillo del 1er piso	104
4.10	Tramo del pasillo del 1er piso	105
4.11	Ocupación en el pasillo del 2do piso	106
4.12	Ocupación en el pasillo del 3er piso	106
4.13	Ocupación en el pasillo del sótano	107
4.14	Ocupantes desalojados por la salida principal del 2do piso	108
4.15	Ocupantes desalojados por la salida principal del 1er piso	109
4.16	Ocupantes desalojados por la salida principal del sótano	109

Capítulo 1

Introducción

El estudio de agentes y sistemas multiagente (SMA) es uno de los temas más importantes y apasionantes de la ingeniería. Forma parte fundamental de la Inteligencia Artificial (IA), donde prácticamente todo está relacionado con agentes. Algunas aplicaciones para satisfacer sus objetivos de diseño, requieren sistemas que decidan qué hacer por sí mismo, y es precisamente allí donde interviene el uso de este paradigma. Tales sistemas ligados al ámbito computacional pueden ser vistos como agentes, con lo cual se busca dar solución a problemas complejos que no son resueltos de manera eficiente mediante técnicas comunes. El proceso de evacuación de personas es un buen ejemplo para experimentar con agentes. En este entorno, cada agente puede decidir por sí mismo qué puerta seleccionar para salir de un recinto o qué ruta utilizar para efectuar el desalojo.

Según Russell y Norvig (2004) un agente es cualquier cosa capaz de percibir su medio ambiente con la ayuda de sensores y actuar en ese medio utilizando actuadores. Para Wood (2000) los sistemas de computación que deciden qué hacer por sí mismo pueden ser vistos como agentes. Y para Botti y Julián (2000) un SMA está formado por un conjunto de entidades inteligentes llamadas agentes que coordinan sus habilidades para resolver problemas individuales o globales.

Esta técnica que forma parte fundamental de la IA, ha sido utilizada para estudiar un número importante de aplicaciones, tales como: control de tráfico aéreo y automotriz, procesos industriales, búsqueda de información, comercio electrónico,

nanotecnología, fútbol con robots (catalogado como un problema estándar para la investigación en IA) y robótica en general. Dichas aplicaciones son abordadas a través de metodologías y plataformas de desarrollo de SMA. La selección de alguna de ellas estará condicionada por el tipo de problema que se quiere resolver, ya que no todas ofrecen las mismas capacidades de diseño.

En edificios de gran capacidad que se encuentren ocupados por un número importante de personas, se requiere tener resuelto de alguna manera el problema de la evacuación, ya que cualquier incidente puede comprometer seriamente la seguridad de sus habitantes. La totalidad de los ocupantes en cualquier instante debe tener la posibilidad de desplazarse hasta un lugar seguro. En muchos casos, debido al tamaño de los edificios, su distribución y el número de ocupantes, para enfrentar el problema de la evacuación, se hace necesaria la utilización de herramientas cuantitativas que permitan estimar de forma aproximada los resultados del desarrollo de este proceso.

De forma general, un proceso de evacuación es asociado a situaciones de emergencia, entendidas como cualquier evento derivado de un peligro cierto, una amenaza o un riesgo subjetivo para la totalidad o un grupo de personas. Dichas situaciones de emergencia pueden generarse como consecuencia directa de incendios, explosiones, amenazas de bombas, actos antisociales, actuaciones colectivas incontroladas, movimientos sísmicos u otros hechos peligrosos presentados bajo distintos escenarios.

Cuando se estudian edificios de gran altura, centros comerciales, centros de enseñanza o edificios de distribución compleja, el problema de la evacuación se torna mucho más complicado. Las características comunes a todos ellos son el tamaño, la existencia de un número importante de personas en el interior de los mismos y la dificultad de conocer una forma adecuada de efectuar su desalojo. Para abordar este problema, han sido modeladas y simuladas las condiciones de un espacio y la dinámica de las personas que lo habitan cuando se lleva a cabo un desalojo o un proceso de evacuación mediante diferentes métodos. Entre los más conocidos se encuentran los modelos realizados con autómatas celulares, los modelos realizados con ecuaciones diferenciales y los modelos realizados con redes de flujo.

Para la evacuación de personas de edificaciones de varios pisos, también se han utilizado los SMA, debido a que esta forma de modelado permite estudiar con un mayor

nivel de detalle, cada una de las variables influyentes en este tipo de estudios. Por ello, este trabajo esta encaminado en modelar y simular mediante SMA la evacuación de personas de edificaciones de varios pisos en presencia de obstáculos, para el cual fue necesario estudiar un conjunto de metodologías y plataformas de desarrollo que permitieran consumir este propósito.

El documento se compone de la siguiente manera: El Capítulo 1 contiene la definición del problema. El Capítulo 2 abarca toda la información teórica utilizada para desarrollar el proyecto. El Capítulo 3 contiene el desarrollo del modelo mediante SMA de la evacuación de un edificio de varios pisos en presencia de obstáculos. El Capítulo 4 muestra los resultados de las simulaciones para cuatro escenarios distintos. Por último, en el Capítulo 5 se mencionan las Conclusiones y Recomendaciones derivadas de las experiencias adquiridas en el desarrollo de la investigación.

1.1 Antecedentes

La simulación del movimiento peatonal involucra la especificación de gran cantidad de variables para la elaboración de los modelos. Se deben tomar en cuenta aspectos relacionados al comportamiento de las personas (influencias psicológicas), los cuales hacen que el proceso de simulación se torne complejo. Una de las aplicaciones que ha sido tomada en cuenta para la creación de dichos modelos es la evacuación de edificios y otros tipos de ambientes ante diferentes eventualidades.

En la búsqueda de los medios apropiados que permitan abordar este tipo de estudios, se han desarrollado trabajos sobre el modelado del movimiento de personas en distintos ambientes bajo el contexto de la simulación utilizando SMA.

A continuación se presenta un resumen de algunos trabajos que sirvieron de antecedentes para la realización de la presente investigación:

En el año 2005 fue realizado por Chaturvedi *et al.* (2005) en la Universidad de Purdue, West Lafayette de Estados Unidos, el estudio: “*Integrating Fire, Structure and Agent Models*”. Para desarrollar este trabajo se utilizó el espacio virtual de un edificio que contenía pasillos, oficinas y puertas de entrada y salida. El fuego se simuló utilizando un simulador de incendios dinámicos, suponiendo que el incendio comienza

como consecuencia de una provocación. Los agentes fueron programados tomando en cuenta los efectos de la temperatura, la expulsión de gases tóxicos y la combustión de materiales a causa del incendio. Estos fueron posicionados en distintos espacios del edificio. En la programación de dichos agentes fue tomado en cuenta el algoritmo del camino más corto, para lo cual deberían estar entrenados sobre las distintas áreas que conforman la estructura. Con este estudio se demostró que la posición del fuego y los agentes, así como el número de salidas, afectan significativamente la integridad de los agentes y la aparición de posibles víctimas.

También se destaca el trabajo realizado por Pérez *et al.* (2005) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales y la Universidad Politécnica de Madrid, el cual lleva por título: “*Simulación del Movimiento de Personas aplicado a la Evacuación de Buques*”. En esta investigación se empleó un micromodelo celular multiagente que divide el escenario para el movimiento de los agentes en celdas cuadradas. El modelo celular del movimiento durante la evacuación fue desarrollado en niveles que involucran la forma en que se dirigen los pasajeros, la dirección que toman y el comportamiento individual. Dicho modelo fue implementado en la aplicación llamada *Sifbup-S* (que permite la simulación del movimiento de personas en 2D en escenarios complejos), utilizando como lenguaje de programación *Visual Basic*. El objetivo principal, fue describir una de las herramientas creadas por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de Madrid para el estudio de evacuación a bordo de buques, con el fin de realizar la comparación de distintos casos que permitan optimizar la disposición general del buque y la distribución de espacios.

En Abril de 2007 se publica el artículo: “*Cellular automaton model for evacuation process with obstacles*” (Varas *et al.*, 2007). Se emplearon autómatas celulares para simular a los peatones en una habitación con obstáculos fijos. Dicha habitación es modelada a través de celdas en dos dimensiones, las cuales pueden estar vacías, ocupadas por un obstáculo o por un peatón. Se introdujeron parámetros que indicaban la permanencia en una posición o la actualización de la misma. Se determina que al haber obstáculos se puede formar el efecto conocido como cuello de botella, ya que se disminuye el espacio de salida tomando en cuenta el número de personas por habitación.

Es importante hacer mención a los resultados obtenidos de la simulación de desalojos realizada a través de agentes computacionales en un contexto real, a un sector perteneciente a la Universidad Central de Venezuela. Para dicha simulación se utilizó la herramienta denominada *gSpaces*, que fue desarrollada como proyecto de tesis en la maestría en Modelado y Simulación de la Universidad de Los Andes (Mérida, Venezuela) por la Arq. Klaudia Laffaille. La simulación contempló la ocurrencia de un sismo para cambiar la configuración formal de las edificaciones y crear la necesidad de desalojarlas (Laffaille *et al.*, 2005). Es importante resaltar que *gSpaces* es una librería del simulador *GALATEA* que permite obtener datos como el tiempo de salida de cada uno de los individuos y el tiempo que permanecen en los espacios, permitiendo que se realicen estudios estadísticos posteriores para determinar la relevancia de los datos obtenidos. Esta aplicación representa una plataforma de simulación de SMA descendiente de *GLIDER*, un simulador de eventos discretos desarrollado en la Universidad de Los Andes.

En el año 2008 fue presentado como Proyecto de Grado, ante la Ilustre Universidad de Los Andes, el trabajo titulado: “*Estudio del uso de Sistemas Multiagentes para el Modelado del Tráfico de Autos*” (Camacho, 2008). Dicho proyecto muestra la viabilidad del uso de los SMA para modelar el flujo de diferentes tipos de autos presente en una intersección, para distintas horas de observación. Se estudió el comportamiento de los conductores y se mostraron datos sobre el número de autos en cola, los tiempos de espera, así como el número de infracciones y los cruces indebidos. En esta investigación fue utilizada la plataforma de desarrollo llamada *Netlogo*.

1.2 Definición del problema

Ocasionalmente, ocurren desastres naturales y eventualidades, cuyas consecuencias dejan un importante número de víctimas y pérdidas materiales. Por esta razón, se debe establecer la responsabilidad de tomar medidas anticipadas para reducir daños y riesgos que puedan afectar a la población. Con este tipo de situaciones se hace necesaria la creación de estrategias y planes de acción, que bajo el criterio de prevención y formas de evacuación, permitan integrar a la sociedad para poder enfrentar y reducir los

efectos que puedan causar determinadas emergencias. Una solución a este problema puede ser abordada a través del uso de SMA, los cuales son empleados para simular situaciones específicas que requieran solución.

Este problema es particularmente difícil, ya que surge la necesidad de estudiar los diferentes comportamientos concernientes al movimiento de personas que se encuentran en las instalaciones de un edificio de varios pisos, en determinado instante de tiempo, ante situaciones que pongan en riesgo sus vidas o su integridad física. Tal es el caso de diferentes tipos de incendios, movimientos sísmicos, inundaciones u otros siniestros que probablemente puedan presentarse.

En esta investigación, la evacuación de las personas en presencia de obstáculos esta representada por la interacción resultante entre los ocupantes de la estructura y el entorno. Dicho entorno esta compuesto por distintas áreas, tales como: pasillos, oficinas, salones, baños, entradas y salidas, así como zonas de esparcimiento.

1.3 Justificación

Muchas instituciones y organismos que tienen sede en edificios de varios pisos no cuentan con planes de prevención y evacuación ante la ocurrencia de eventualidades que pongan en riesgo la vida de las personas. Esta situación no es ajena a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes.

Pueden darse situaciones de peligro, tales como: expulsión de gases tóxicos de laboratorios de química, incendios, agrietamiento de la estructura a causa de movimientos de tierra, entre otros. Este tipo de eventos pueden ser entendidos de una manera apropiada a través de la simulación del movimiento de personas en procesos de evacuación, mediante el uso y la programación de SMA.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Modelar y simular a través de la metodología de sistemas multiagente la evacuación de personas de edificaciones de varios pisos en presencia de obstáculos, ante un evento

sísmico.

1.4.2 Objetivos específicos

- Revisar las metodologías de desarrollo de SMA que puedan ser aplicadas al modelado de evacuación con obstáculos.
- Observar y caracterizar comportamientos en grupos de personas con perfiles predefinidos. Dichos comportamientos ocurrirán durante el movimiento peatonal en el proceso de evacuación.
- Medir mediante el proceso de simulación un conjunto de variables, tales como: tiempos de desalojo, ocupación de espacios, cruces en cada puerta y rutas empleadas por cada tipo de ocupante.
- Predecir la cantidad de personas que desalojan el edificio.
- Estudiar los mecanismos de prevención de desastres existentes en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes.

1.5 Metodología

La presente investigación se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Se revisaron los conceptos relacionados con agentes y SMA, así como teorías sobre la simulación del movimiento de personas en procesos de evacuación.
- Se hizo efectiva la revisión de metodologías y plataformas de desarrollo de SMA que han sido utilizadas para el modelado de evacuación de personas en diferentes tipos de ambientes.
- Se seleccionó la plataforma de desarrollo de SMA llamada GALATEA y su módulo de trabajo espacial denominado gSpaces.
- Se revisaron algunos trabajos realizados con la plataforma de desarrollo de SMA seleccionada.

-
- Se determinaron las variables de las características funcionales de los agentes.
 - Se diseñó el ambiente bajo el cual se realizaron las simulaciones.
 - Se desarrolló el modelo de evacuación.
 - Se programó y se construyó el SMA siguiendo las especificaciones del modelo.
 - Se modificaron las clases de gSpaces, encargadas de: crear a los agentes, dividir cada espacio en celdas, construir dichos espacios y crear las puertas.
 - Se diseñó e implementó el tipo de puerta que comunica un piso con otro.
 - Se implementaron las reglas de movimiento de cada tipo de agente.
 - Se realizaron las pruebas con el SMA desarrollado para observar los comportamientos resultantes del modelo de evacuación con obstáculos a través del proceso de simulación.

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se abordan los conceptos fundamentales del paradigma de los agentes y se describen factores importantes que determinan el proceso de evacuación de edificios. De igual forma, se hace una descripción sobre la simulación de espacios y la dinámica de los ocupantes usando SMA. Sumado a esto, se enumeran un conjunto de plataformas y metodologías de desarrollo de SMA, detallando de manera particular la aplicación seleccionada para modelar y simular el sistema.

2.1 Agentes

2.1.1 Definición

Existen numerosas definiciones de agente, ya que pueden ser concepto del estudio de varias áreas, como por ejemplo: inteligencia artificial, sistemas distribuidos, ingeniería del software, redes y sistemas autónomos entre otras. Cada investigador de algunos de los campos mencionados realiza su definición de acuerdo a sus metas y métodos de investigación. Algunas de estas definiciones se muestran a continuación:

Un agente es cualquier cosa capaz de percibir su medio ambiente con la ayuda de sensores y actuar en ese medio utilizando actuadores (Russell y Norvig, 2004).

Según Wooldridge y Jennings (1995), un agente es un sistema situado en un determinado entorno, capaz de actuar de forma autónoma y razonada en dicho entorno.

Para Weiss (1999), los agentes son simplemente un sistema computacional con la

capacidad de tomar acciones autónomas en un medio, para así cumplir sus objetivos.

Según Nwana (1996), el término agente se refiere a un componente de software y/o hardware que es capaz de actuar para poder ejecutar tareas en nombre de un usuario.

Maes (1994), describe a los agentes como sistemas computacionales que habitan en algún ambiente dinámico y complejo, pudiendo sentir ese entorno y actuar en consecuencia, tomando en cuenta el conjunto de objetivos y motivaciones que intenta conseguir a través de sus acciones.

Según Franklin y Graesser (1996), un agente autónomo es un sistema situado dentro de un medioambiente que percibe y actúa sobre él por un tiempo, en persecución de su propia agenda y afectando así lo que sentirá en el futuro.

Sin embargo, para la mayoría de investigadores el término agente tiene un significado más fuerte y específico, donde se considera que los agentes son sistemas computacionales que, además de las propiedades ya citadas, son desarrollados o implementados utilizando conceptos normalmente aplicados a los humanos. Por ejemplo, es muy común en IA caracterizar un agente utilizando términos mentales como conocimiento, opinión, intención y obligación.

Para el caso presente, tomando en cuenta la experiencia adquirida durante el desarrollo del proyecto, se define un agente como un ente computacional diseñado con un conjunto de acciones para funcionar bajo cierta arquitectura, que le permita desenvolverse en un entorno virtual, tomando decisiones por cuenta propia sin la intervención humana o de otros sistemas, con la finalidad de cumplir un objetivo no necesariamente alcanzable. Las acciones con las que haya sido programado el agente, podrán afectar su ambiente y serán ejecutadas si se cumplen las precondiciones estipuladas en el diseño.

2.1.2 Propiedades y características de los agentes

En base a todas las definiciones anteriores es posible extraer algunas características que deben tener los agentes: deben ser parte de un ambiente, deben percibir su entorno y actuar sobre él y deben responder según los objetivos para los cuales fueron diseñados. Por lo tanto, tienen que poseer una serie de atributos o propiedades que lo definen como agente (Wooldridge y Jennings, 1995):

- **Autonomía.** Capacidad de actuar sin la intervención directa de una persona o de otro agente. Un agente debe poder controlar sus propias acciones y estado interno. Una vez que el usuario activa el agente indicando algún objetivo de alto nivel, éste actúa independientemente, seleccionando estrategias y monitorizando el progreso en busca de la meta. Si falla con una estrategia, usará otra, pero sin intervención humana o con la mínima indispensable.
- **Habilidad social.** Un agente debe ser comunicativo. Debe tener habilidad para interactuar con otros agentes o incluso con alguna persona, para solicitar información o bien para exponer los resultados obtenidos de la ejecución de las tareas. La naturaleza de la comunicación dependerá del tipo de agente con quien se comunique (humanos o no); en ambos casos se deberá establecer un protocolo común de intercambio de información entre ambas partes (un tipo de lenguaje de comunicación de agentes).
- **Reactividad.** Se refiere al hecho de que un agente debe poder percibir el estado del ambiente dentro del cual se encuentra inmerso y en función de esto actuar, respondiendo de manera adecuada a cambios producidos en el mismo (a tiempo para que la respuesta sea útil). Los efectos producidos pueden modificar el estado de su entorno. Por ejemplo, un agente de filtrado de correo electrónico que esta percibiendo su ambiente, alerta a la llegada de nuevos mensajes. La llegada de un mensaje (cambio en el medio) produce que el agente responda de acuerdo a las tareas asignadas.
- **Proactividad.** Un agente no sólo debe actuar en respuesta a los cambios detectados en el medioambiente, sino que además debe trabajar en función de los objetivos para los cual fue diseñado y las tareas que le fueron delegadas en cada momento. Esto indica que los agentes son capaces de presentar comportamientos dirigidos hacia metas específicas tomando la iniciativa.

Según algunos autores, tales como, Franklin y Graesser (1996) y Nwana (1996), existen otros atributos que pueden determinar el funcionamiento de los agentes:

- **Continuidad temporal.** Un agente es un proceso temporalmente continuo. A

diferencia de un programa convencional del cual se conoce su inicio y su fin, un agente debe ejecutarse hasta que se haya alcanzado con el conjunto de objetivos solicitados, o bien, mientras su ciclo perdure y su usuario no desee detenerlo. La continuidad temporal es la propiedad que da vida al agente, posibilitando que se mantenga alerta a una solicitud o a algún cambio en el medio. El ciclo de vida de un agente depende de sus características, de las tareas que realice y de los deseos de su usuario en cuanto al tiempo durante el cual el agente debe ejecutarse.

- **Movilidad.** Es la capacidad de un agente de trasladarse por las redes de computadoras, de nodo a nodo, en busca de los recursos que le permitan cumplir con su objetivo. Trasládarse indica que en un determinado instante de tiempo el agente detiene su ejecución, almacena su estado interno y se dirige a otro sitio dentro de una red, para luego continuar con su ejecución en la nueva ubicación. Los recursos a los que puede acceder pueden ser de software o hardware. Por ejemplo, un agente puede ir en busca de una base de datos que se encuentra en cierta máquina o bien ejecutarse remotamente haciendo uso del procesador y memoria del equipo destino.
- **Adaptabilidad.** Esta relacionado con el aprendizaje que un agente es capaz de realizar y si puede cambiar su comportamiento basándose en ese aprendizaje.
- **Veracidad.** Un agente debe comunicar información precisa sobre su percepción del entorno. El agente no comunica información falsa a propósito.
- **Benevolencia.** Un agente esta dispuesto a ayudar a otros agentes si esto no entra en conflicto con sus propios objetivos.

2.1.3 Clasificación de los agentes

Los agentes pueden clasificarse de varias maneras, teniendo en cuenta algunas de las propiedades que poseen, o bien, haciendo énfasis en alguna en particular. Pero desde otra perspectiva los agentes se pueden clasificar de acuerdo a líneas de investigación y desarrollo, tomando en cuenta la función principal del agente. Puede entonces hacerse la siguiente clasificación según Tolosa y Bordignon (1999):

- **Agentes colaborativos**

Este tipo de agentes se enfatiza en la autonomía y las habilidades sociales con otros agentes para ejecutar las tareas de sus usuarios. La coordinación, cooperación e intercambio de conocimiento de los agentes se logra mediante esquemas de comunicación y negociación para alcanzar acuerdos que sean aceptables.

Los agentes colaborativos son capaces de actuar autónoma y racionalmente en ambientes multiagente y con restricciones de recursos. Otras características de estos agentes es que poseen habilidades sociales, son proactivos, benévolos y veraces. Sumado a esto, es importante destacar que los sistemas construidos en base a los agentes colaborativos permiten extender la funcionalidad del sistema más allá de las capacidades de uno de sus miembros.

Los agentes colaborativos se pueden utilizar en la solución de algunos de los siguientes problemas: resolución de problemas que son muy grandes para un agente centralizado, interconexión e interoperabilidad de sistemas de IA existente (sistemas expertos, sistemas de soporte de decisión, entre otros), soluciones que simulen recursos de información distribuidos, incrementar la modularidad, velocidad, confiabilidad, flexibilidad y reutilización en sistemas de información.

- **Agentes de interfaz**

Los agentes de interfaz se enfatizan en la autonomía y la adaptabilidad para realizar tareas a sus usuarios. Este tipo de agentes básicamente presta soporte y asistencia a un usuario que esta aprendiendo una nueva aplicación o nuevos conceptos. Lo verdaderamente trascendental en un agente de este tipo es que puede adaptarse a las preferencias y hábitos de sus usuarios.

El agente de interfaz aprende a dar una mejor asistencia al usuario de cuatro maneras: observando e imitando al usuario, recibiendo reacciones positivas y negativas del usuario, recibiendo instrucciones explícitas del usuario, preguntando a otros agentes.

De esta manera, el agente puede actuar como un asistente personal y autónomo del usuario, cooperando con él para terminar una tarea.

- **Agentes móviles**

Los agentes móviles son procesos computacionales capaces de viajar por nodos de una red de espacios, redes de computadoras, navegando por Internet, interactuando con equipos y acumulando información. Los atributos de movilidad en los agentes han introducido el concepto de programación remota, donde un mismo agente puede actuar tanto de cliente como de servidor.

La noción de movilidad viene del objetivo de reducir el tráfico innecesario dentro de una red, con lo que se pueden reducir los costos de comunicación. Además, al aportar una nueva forma de computación distribuida posibilita el mejor aprovechamiento de los recursos de la red y permite que los usuarios tengan acceso a una cantidad mayor de recursos.

Para construir sistemas con agentes móviles es necesario resolver algunas cuestiones fundamentales tales como (Nwana, 1996):

- **Transporte:** forma en la cual se mueven de un lugar a otro.
- **Ejecución:** ejecución del agente en forma remota.
- **Autenticación:** forma de comprobar si el agente es quien dice ser y a quién representa.
- **Privacidad:** asegurar que el agente mantenga resguardado su estado interno.
- **Seguridad:** protección contra archivos maliciosos. Prevenir que el agente entre en bucles infinitos o falle.

- **Agentes de información**

Los agentes de información nacieron debido a la gran cantidad de herramientas que surgieron para el manejo y recuperación de información. Son agentes que tienen acceso a fuentes de información potenciales y están capacitados para manejar, manipular e integrar información obtenida de esas fuentes y dar respuesta a las cuestiones planteadas por el usuario o por otros agentes.

La idea fundamental de los agentes de información es que puedan mejorar de algún modo, pero no completamente, el problema de la sobrecarga de información y en general el manejo de esta.

Sin embargo, existe una clasificación general, según Quintero *et al.* (2003) de dos tipos de agentes:

- **Agente cognitivo**

Efectúa operaciones complejas, siendo individualmente inteligente y pudiendo comunicarse con los demás agentes y llegar a un acuerdo con algunos de ellos. Un agente de este tipo representa un sistema con capacidad de razonamiento sobre su base de conocimiento. Por lo general un sistema cognitivo se compone de un número pequeño de agentes cognitivos.

- **Agente reactivo**

Es un agente de bajo nivel, que no dispone de un lenguaje de comunicación y cuya única capacidad es responder a estímulos. Los agentes reactivos no son individualmente inteligentes, sino globalmente inteligentes. Los sistemas reactivos están compuestos por un gran número de agentes reactivos que realizan acciones entre todos, según formas de comunicación y cooperación implementadas por el modelista para permitir el desempeño de dichas acciones.

Una vez presentadas las formas de clasificación de agentes que recogen de manera explícita la caracterización de los mismos, se define el tipo de agente que cumple con los requerimientos del presente estudio. Se considera que éste posee características de ambas clasificaciones y se define como agente móvil y reactivo.

Un agente móvil y reactivo, esta en capacidad de desplazarse por los distintos nodos que componen una red de espacios respondiendo al estado de las variables del ambiente en el que se encuentra. Los agentes de este tipo están implementados de tal forma que la comunicación y la interacción entre ellos, se den en base a la información que perciban de su entorno. Esa información es empleada para ejecutar la forma de traslado con la que posteriormente lograrán los objetivos para los cuales fueron creados.

2.1.4 Arquitecturas de agentes

Una arquitectura permite descomponer un sistema computacional en componentes más pequeños y determinar cómo es la relación entre estos. Una arquitectura para agentes en particular, permite descomponer un sistema de agentes y determinar cómo deben interactuar entre ellos y con el ambiente.

Dos definiciones sobre arquitectura de agentes se muestran a continuación:

Kaelbling (1993): Una colección específica de módulos de software (o hardware), típicamente representados por cajas con flechas que indican el flujo de control de datos entre los módulos. Desde una visión más abstracta, una arquitectura es una metodología general para diseñar una descomposición particular de una tarea en módulos.

Maes (1991): Una metodología particular para construir agentes. Ésta especifica cómo puede descomponerse el agente en la construcción de un conjunto de módulos de componentes y cómo deben ser hechos estos módulos para interactuar. El conjunto total de módulos debe responder a la pregunta de cómo la data de los sensores y el estado interno del agente determinan sus acciones y el futuro estado interno del agente. Una arquitectura abarca las técnicas y los algoritmos que soportan esta metodología.

Pueden existir muchos tipos de agentes, cada uno de ellos desarrollando las tareas para las que ha sido creado. Y mientras para unos el tiempo se convierte en un recurso crítico, otros podrán tomar decisiones más racionales al disponer del tiempo y el conocimiento suficiente para ello; unos agentes serán más complejos e inteligentes que otros. No existe, por tanto, una única arquitectura ideal para agentes. La estructura concreta de las arquitecturas dependerá de las tareas y el entorno donde éstas se desarrollen. Según estas apreciaciones, se puede clasificar la arquitectura interna de un agente de la siguiente manera (Quintero *et al.*, 2003):

- **Funcionalidad**

Es el conjunto de funciones o tareas que el agente sabe hacer y que los demás agentes pueden conocer que él hace. Dentro de estas funciones pueden estar los métodos de comunicación con otros agentes, de selección de agentes para una tarea específica, de obtener información del sistema, de información del estado interno del agente, entre otros.

- **Creencias**

Son el conocimiento subjetivo o conjunto de opiniones que el agente tiene de sí mismo y de los demás agentes. Puede comenzar como una opinión o conocimiento inicial y cambiar con las acciones y desempeño de cada uno de los agentes, incluido él mismo, cuando el sistema esté en funcionamiento.

- **Conocimiento**

Es el conocimiento que cada agente tiene y que usa para la resolución de un problema, es decir, la representación de lo que sabe y del conocimiento que ha adquirido en experiencias pasadas y que le sirve para hallar soluciones o seleccionar acciones a seguir en cualquier momento. El conocimiento le permite al agente entender el mundo, lo que los demás agentes tratan de decirle y sus razonamientos internos, así como explicar sus ideas y decisiones.

- **Control**

El control en un agente está representado por la estructura local de metas, intenciones, planes y acciones que el agente tiene.

- **Metas:** son el conjunto de estados deseables en el ambiente en el que se desenvuelve un agente. Un agente puede decidir alcanzar o no cada una de tales metas de acuerdo a las ventajas que representen. En un SMA hay una meta global o principal que debe ser alcanzada con la colaboración de todos los agentes del sistema.
- **Plan:** representa un conjunto de estrategias para resolver un problema o alcanzar una meta. Los planes que desarrolla cada agente para alcanzar

su propia meta, pueden ser combinados para desarrollar un plan global que sirve para alcanzar la meta global.

- **Estrategia:** es la descripción de las acciones de los agentes a un nivel grueso de detalle. Corresponden a abstracciones de los posibles comportamientos de los agentes y hacen más simple entender, especificar e implementar agentes. Las estrategias no adicionan habilidades a los agentes, simplemente ayudan a diseñar, analizar y organizar mejor las destrezas que los agentes ya poseen.
- **Intención:** se puede definir como el objetivo concreto o el fin que se pretende alcanzar al realizar una o varias acciones; este objetivo se puede describir con proposiciones lógicas. Se puede decir que las intenciones son la causa de las acciones de un agente. Por otro lado, un agente realiza acciones tratando de seguir sus estrategias. De las intenciones se deriva la capacidad con la cual los agentes pueden usar conceptos para predecir y explicar el comportamiento de otros agentes, además son muy útiles porque son abstracciones de los estados y comportamiento del sistema en general.

• Comunicaciones

Los agentes cognitivos cuentan con mecanismos de comunicación que les permiten interactuar con los otros agentes para la resolución cooperativa de problemas, para la coordinación o sincronización de acciones, para resolver conflictos con recursos, para participar en una negociación o simplemente para enviar información. Uno de los mecanismos de comunicación entre agentes en un SMA es el paso de mensajes. Un agente puede contar con funciones de selección que indiquen los destinos de un mensaje. A continuación se describen en forma breve algunos tipos de comunicación:

- **Comunicación selectiva o difusa:** en la comunicación selectiva, los agentes destino de los mensajes son escogidos por medio de alguna función de selección; en la comunicación difusa o “broadcast”, por el contrario, el mensaje es enviado a todos los agentes.
- **Comunicación con o sin espera de confirmación:** se dice que existe comunicación con espera de confirmación, si el agente emisor espera un

mensaje de “acknowledge” de recepción por parte del agente receptor. Si el agente emisor no espera dicho mensaje de reconocimiento, se dice que existe comunicación sin espera de confirmación.

- **Comunicación de transmisión simple o con retransmisión:** en la comunicación de transmisión simple, el emisor transmite sólo una vez un mensaje; en la comunicación con retransmisión, el emisor retransmite varias veces un mensaje.

2.1.5 Tipos de ambientes para agentes

El diseño del agente esta basado en las características del ambiente y el control que el agente pueda tener sobre este. Russell y Norvig (2004) sugieren la siguiente clasificación de ambientes:

- **Totalmente observable vs parcialmente observable.** Un ambiente totalmente observable o accesible es uno en el que el agente puede obtener una información completa y precisa acerca del estado del ambiente, gracias a que sus sensores le proporcionan acceso al estado completo del medio en cada momento. Ambientes moderadamente complejos son parcialmente observables debido al ruido y a la existencia de sensores poco exactos.
- **Determinista vs Estocástico.** Un ambiente determinista es uno en el que cualquier acción tiene garantizado un único efecto, es decir, que si el siguiente estado del medio esta totalmente determinado por el estado actual y la acción ejecutada por el agente, entonces el entorno es determinista; en caso contrario es estocástico. En la mayoría de los casos los agentes no tienen un control completo del ambiente, sino que tienen un control parcial, es decir, pueden influir en el ambiente. Desde el punto de vista del agente, esto significa que la misma acción realizada dos veces, en idénticas circunstancias, podría tener efectos completamente diferentes, en particular, podría fallar en cumplir con el efecto deseado.
- **Episódico vs Secuencial.** En un ambiente episódico la experiencia de un agente se divide en episodios atómicos (percepción, acción). El próximo episodio no

depende de la acción tomada en el episodio anterior. En ambientes secuenciales la decisión actual puede afectar a las decisiones futuras. Los medios episódicos son más simples que los secuenciales porque la gente no necesita pensar con tiempo.

- **Estático vs Dinámico.** Si el entorno puede cambiar cuando el agente esta deliberando, entonces se dice que el entorno es dinámico para el agente; de otra forma se dice que es estático. Los medios estáticos son fáciles de tratar ya que el agente no necesita estar pendiente del mundo mientras esta tomando una decisión sobre una acción, ni necesita preocuparse sobre el paso del tiempo. Los medios dinámicos de forma contraria están preguntando al agente todo el tiempo qué quiere hacer; si no se ha decidido aun, se entiende por omisión que no ha decidido nada. Si el entorno no cambia con el paso del tiempo, pero el rendimiento del agente cambia, entonces se dice que el medio es semidinámico.
- **Discreto vs Continuo.** La distinción entre discreto y continuo se puede aplicar al estado del medio, a la forma en la que se maneja el tiempo y a las percepciones y acciones del agente. Un ambiente es discreto, si existen en él, un número fijo y finito de acciones y percepciones. El juego de ajedrez es un ejemplo de ambiente discreto y manejar un taxi un ejemplo de un ambiente continuo. Las imágenes captadas por cámaras digitales son discretas, pero se tratan típicamente como representaciones continuas de localizaciones variables.

La clase de ambientes más complejos es el parcialmente observable, estocástico, secuencial, dinámico y continuo.

2.2 Sistemas Multiagente (SMA)

Un sistema en el cual interviene más de un agente, involucra el concepto de sistemas multiagente, y se define como una asociación de agentes que trabajan juntos para resolver problemas que van más allá de sus capacidades individuales.

Según Botti y Julián (2000) un SMA esta formado por un conjunto de entidades llamadas agentes que coordinan sus habilidades para resolver problemas individuales o globales. Un sistema distribuido puede ser visto como un SMA, en el cual los nodos son

sistemas de inteligencia artificial y su conducta produce un resultado conjuntamente inteligente.

El desarrollo y la investigación en los SMA están principalmente orientados a la coordinación de las actuaciones entre los agentes que los forman, como conjugar sus conocimientos, objetivos, habilidades y planes para que conjuntamente puedan ayudar a resolver problemas.

Para poder obtener comportamientos coherentes en los sistemas, los agentes individuales no deben sólo ser capaces de compartir su conocimiento sobre los problemas y soluciones que posean, sino que también deben tener en cuenta los procesos de coordinación y control global, la consecución de los objetivos marcados para el sistema, e incluso la representación general del mismo, por lo que las tareas de coordinación dentro de un SMA pueden ser complicadas.

La inteligencia de un SMA puede obtenerse de dos maneras. En primer lugar, mediante el uso de agentes inteligentes para el sistema. En segundo lugar, usando agentes reactivos (estímulo-respuesta ó percepción-acción). En este caso, la inteligencia colectiva del sistema es un fenómeno (comportamiento) emergente.

Estos sistemas considerados como un todo, exhiben características particulares, que se presentan a continuación (Quintero *et al.*, 2003):

- **Organización social**

La organización social define la forma como el grupo de agentes esta constituido en un instante dado y esta relacionada con la estructura de los componentes funcionales del sistema, sus características, sus responsabilidades, sus necesidades y la manera como realizan sus comunicaciones.

Se puede considerar que una sociedad de agentes esta constituida por tres elementos: un grupo de agentes, un conjunto de tareas a realizar y un conjunto de recursos.

De acuerdo al tipo de comunicación, al modo de cooperación entre agentes y a su tipo, se pueden distinguir tres tipos de organizaciones:

- **Estructura centralizada.** Existe un agente que controla la interacción de

los demás agentes del sistema porque tiene la información o la funcionalidad para hacerlo.

- **Estructura horizontal.** Este tipo de configuración existe cuando todos los agentes que integran un sistema están al mismo nivel, es decir, no hay ningún agente que haga las veces de maestro o supervisor, ni tampoco agentes esclavos.
- **Estructura jerárquica.** En esta configuración los agentes trabajan en diferentes niveles de abstracción de un problema. En un mismo nivel se establece una configuración horizontal, si hay más de un agente. Para resolver un problema cada agente divide el problema en subproblemas que él puede resolver, subproblemas que puede resolver con la cooperación de los agentes que están al mismo nivel y subproblemas que sabe que los agentes de niveles inferiores de la jerarquía pueden resolver.
- **Estructura “ad hoc”.** Esta configuración puede ser una mezcla de las tres anteriores. Se caracteriza porque la dinamicidad de la estructura esta regida por el ajuste mutuo entre los pequeños grupos de agentes en el sistema.

- **Cooperación**

En un SMA existen dos tipos de tareas que deben ser realizadas: las tareas locales y las tareas globales. Las tareas locales son las tareas relacionadas con los intereses individuales de cada agente y las tareas globales son las tareas relacionadas con los intereses globales del sistema. Las tareas globales son descompuestas en subtareas para que cada una de ellas sea abordada por un agente de acuerdo a sus habilidades. Luego se integran los resultados para llegar a la solución global. Para que los agentes puedan cooperar de manera eficiente, cada uno de ellos debe tener ciertas características:

- Tener un modelo bien definido del entorno, que le permite localizar a los demás agentes, saber cómo comunicarse con ellos y qué tareas pueden realizar.

- Poder integrar información de otros agentes con la suya, para formar conceptos globales o conocimiento conformado por varios agentes.
- Poder interrumpir un plan que se esté llevando a cabo para ayudar o atender a otros agentes para que puedan cooperar entre sí.

- **Coordinación**

La coordinación entre un grupo de agentes les permite considerar todas las tareas a realizar y tener cuidado de no ejecutar acciones indeseables. Estas acciones pueden ser, que los agentes no generen y comuniquen subsoluciones que lleven al progreso en la solución de un problema, que los agentes generen y comuniquen resultados redundantes, o que surja una distribución inapropiada de la carga de trabajo entre los agentes.

Hay varios modelos de coordinación de acciones entre agentes, de los cuales se destacan dos:

- **Coordinación global.** Cuando el SMA determina y planifica globalmente las acciones de los diferentes agentes.
- **Coordinación individual.** Cuando el SMA le da completa autonomía a los agentes para que decidan qué hacer e intenten resolver localmente los conflictos que detecten con otros agentes.

- **Negociación**

Para que los mecanismos de cooperación y coordinación sean exitosos en un sistema de agentes, debe existir un mecanismo adicional, por medio del cual los integrantes de un sistema se puedan poner de acuerdo cuando cada agente defiende sus propios intereses, llevándolos a una situación que los beneficie a todos teniendo en cuenta el punto de vista de cada uno. Este mecanismo es llamado negociación.

Los procesos de negociación tienen como resultado la modificación o confirmación de las creencias de cada agente involucrado, en lo relacionado con los demás agentes y con el mundo en el que se desenvuelve.

La negociación se puede mirar bajo una perspectiva racional, la cual describe la negociación como un proceso de seis pasos:

- Definir el problema
- Identificar aspectos
- Ponderar criterios
- Generar alternativas
- Evaluar alternativas
- Formular solución

Para llevar a cabo el proceso de negociación se toman en cuenta las siguientes dos reglas:

- **Consenso o unanimidad.** Una decisión es tomada cuando todos los miembros de un grupo están de acuerdo con dicha decisión. Es posible que se llegue a esto después de negociar varias veces la decisión.
- **Mayoría.** Una decisión es tomada cuando la mayoría de los miembros de un grupo esta de acuerdo con dicha decisión. La definición de mayoría depende del sistema y se puede relacionar con el número de votos a favor de una decisión.

- **Control**

El control se relaciona directamente con determinar cuáles son las subtarear más importantes a realizar en un momento dado, determinar qué contexto deben ser usados en la solución de esas actividades, así como estimar el tiempo de generación de dicha solución y evaluar si el tratamiento de un problema ha sido generado.

El control puede ser aplicado bajo dos tendencias: control global y control local. El control global se relaciona con tomar decisiones basándose en datos obtenidos a partir de la información de todos los agentes del sistema; el control local se relaciona con tomar decisiones basándose sólo en datos locales.

Un mecanismo empleado para la implementación del control en un SMA, es la creación y manejo de estructuras que puedan accesar todos los agentes y en las que se representen, organicen e integren, a alto nivel, las metas globales y locales del sistema.

2.3 Evacuación de edificios

Un sistema de evacuación se conforma por un conjunto de entidades, ocupadas por cierto número de personas con características particulares, que buscan desplazarse desde espacios ocupados hasta otros lugares que constituyen el destino de la evacuación, el cual es, por lo general, una zona cercana al edificio con capacidad suficiente para albergar la totalidad de los ocupantes. Por otro lado, hay ocasiones en que el destino de evacuación puede ser una dependencia más del edificio que reúna condiciones de ubicación segura.

2.3.1 Factores que determinan el proceso de evacuación

Los aspectos que deben ser considerados para el estudio de un proceso de evacuación según Casadesús (2005), son los siguientes:

- Configuración del edificio
- Factores ambientales
- Características personales
- Conducta de los individuos
- Procedimientos establecidos e implantados

Aspectos relevantes de la configuración del edificio

El edificio define el entorno en el cual se produce la emergencia. Incluye el conjunto de características arquitectónicas que determinan las condiciones de evacuación y las características del punto de reunión.

Las características arquitectónicas más importante para la evacuación del edificio son: el número de pisos, la superficie y distribución geométrica de cada piso, la ubicación de las salidas, las dimensiones de los pasillos y de las escaleras, la existencia y características de medios mecánicos para el desplazamiento de los ocupantes como ascensores y escaleras mecánicas, la existencia de los sistemas de señalización, las condiciones de iluminación, la resistencia al fuego y los sistemas de ventilación.

En cuanto a las escaleras, las más habituales son las de tramos rectos. Como elemento de evacuación deben garantizar una determinada resistencia al fuego, así como una capacidad aceptable de aislamiento y deben disponer de sistemas de evacuación de humos. Las señales de desalojo colocadas en las paredes y aquellas situadas en las salidas sirven para indicar recorridos hacia los destinos de evacuación.

Aspectos relevantes de los factores ambientales

Los factores ambientales se refieren al conjunto de efectos físicos y químicos que se generan al producirse cualquier evento capaz de poner en marcha la evacuación del edificio. Los fenómenos que se producen influyen directamente en la capacidad de los ocupantes para encontrar las salidas y alteran las funcionalidades de los mismos. Entre estos fenómenos se pueden mencionar:

- **Efecto del humo**

El humo causa una dificultad de visión y afecta física y psicológicamente a los ocupantes. La velocidad de reacción ante la aparición del humo, será función de la gravedad del incidente percibida a través de los efectos que produce. Durante el proceso de evacuación de un edificio, el humo puede afectar a los ocupantes de forma diferente. De manera positiva puede advertir de la existencia de un incendio y provoca su respuesta, a su vez, afecta negativamente cuando los ocupantes deciden abandonar el recinto, dado que el nivel de humo en el ambiente dificulta encontrar las salidas, al tiempo que reduce las velocidades de desplazamiento, pudiendo bloquear alguna vía de evacuación. Existen numerosos estudios del efecto del humo en la conducta de los ocupantes de los edificios, en los que se concluye que en el 60 % de los casos los ocupantes deciden desplazarse a través

del humo. Según este porcentaje es importante analizar la forma en que el humo afecta la movilidad de las personas, tomando en cuenta las características del mismo y la familiaridad que tengan los ocupantes con el recinto.

- **Efecto del calor y de los fenómenos radiantes**

En los edificios pueden existir productos de elevada capacidad calorífica y combustión rápida, por ejemplo combustibles líquidos o gases, por lo cual antes de apreciarse la existencia de humos, el edificio se ve afectado por el calor y la evacuación condicionada por el mismo. El calor se transmite por conducción, convección y radiación, resultando difícil evaluar la cantidad de calor que puede recibir cada individuo. Una manifestación del nivel de calor que afecta una dependencia es la temperatura. Las personas son capaces de soportar temperaturas realmente elevadas durante cortos espacios de tiempo, circunstancia que puede producirse en una evacuación de emergencia. Directamente relacionado con el calor y los incendios se encuentran los fenómenos radiantes. Si los ocupantes de un edificio deben circular en presencia de fenómenos radiantes, normalmente a causa de un incendio, estarán sometidos a una fuente de energía externa que además de afectarles físicamente puede influir psicológicamente pudiendo inhabilitar las salidas próximas al foco de la radiación.

Características personales de los ocupantes

Existen personas cuya capacidad de movilidad, auditiva o visual es limitada y les impide desenvolverse normalmente en una evacuación. Se deben tener en consideración especial a las personas cuya capacidad intelectual no les permite interpretar las indicaciones o seguir una determinada pauta de comportamiento en una situación de emergencia; en estos casos se precisa la colaboración directa de otros ocupantes para que puedan abandonar el edificio. Para medir la capacidad de movimiento de los ocupantes hay que considerar los siguientes parámetros:

- **Dimensiones de los individuos**

Existe una referencia que asemeja la proyección horizontal de una persona adulta a una elipse en la cual el valor medio de los diámetros mayor y menor son 0.61

y 0.46 metros respectivamente. Otra representación empleada es la propuesta por Thompson y Marchant (1995), que consiste en representar a las personas mediante tres círculos cuyas dimensiones dependen del sexo y la edad de los individuos (ver figura 2.1).

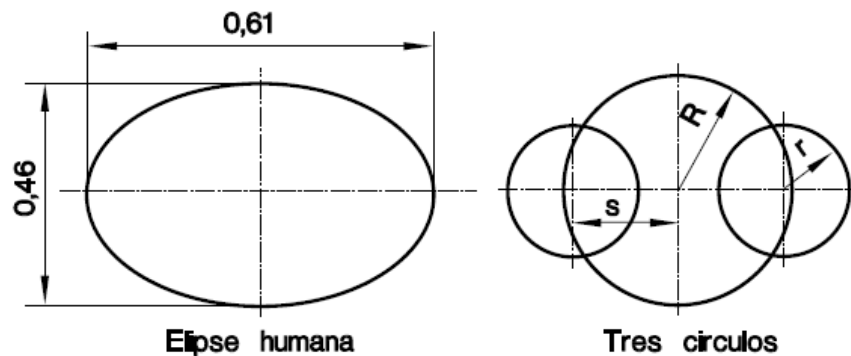


Figura 2.1: Representación de la proyección de la figura humana

- **Magnitudes de movimiento**

Uno de los puntos importantes referentes a magnitudes de locomoción, consiste en estimar la velocidad de circulación de los individuos. Estudios realizados en el área, demuestran que las personas alcanzan la velocidad máxima a los 20 años y luego desciende constantemente. En promedio para una circulación normal la velocidad se ubica en 1,2 metros por segundo, mientras que para un movimiento rápido supera los 1,8 metros por segundo. La velocidad de circulación es máxima cuando no existe interferencia en el movimiento de las personas, disminuye linealmente con la densidad de ocupación y puede llegar a anularse cuando se alcanzan valores de 3,5 personas por metro cuadrado (Fruins, 1993).

Estudio de la conducta de los individuos

Se refiere a la conducta individual y colectiva de los ocupantes al conocer una eventual situación de peligro mediante una señal de alarma, con el fin de pronosticar un desplazamiento inmediato y considerar demoras en el inicio de la evacuación y de las decisiones que conducen a utilizar una determinada salida.

En un principio la respuesta esta condicionada por la actividad que esta desarrollando el individuo: durmiendo, trabajando, comiendo, siguiendo una actividad educativa, ejercitándose, entre otras. En cualquier caso, debe considerarse que las personas necesitan tiempo para la toma de decisiones. Ante una señal de alarma es de esperar que no se produzca una reacción inmediata, y esta reacción siempre estará condicionada por otros factores como el tipo de edificio, los sistemas de alarma y de señalización, la familiaridad de los ocupantes con el edificio y la interacción que se establezca entre ellos.

- **Efecto del sistema de alarma**

El propósito del sistema de alarma es el de indicar a los ocupantes que deben abandonar el edificio. La efectividad del sistema de alarma es esencial para materializar con éxito una evacuación de emergencia. Dicha efectividad no sólo reduce el tiempo de reacción de los ocupantes sino que además debe ser el punto de partida de las actuaciones previstas para facilitar la evacuación. Las principales características del sistema de alarma son la claridad y la credibilidad. La claridad de un sistema de alarma se refiere a la información que el sistema transmite a los ocupantes, si es capaz de comunicar claramente que ha ocurrido un incidente y que es necesaria la evacuación del edificio. La utilización de sistemas de megafonía puede resultar más útil que una simple señal de alarma acústica o bien óptica. La credibilidad del sistema de alarma depende de la frecuencia con que se hayan producido falsas alarmas. La frecuencia de los fallos afecta la forma de responder de los ocupantes en un recinto en el que a menudo se producen falsas alarmas. La efectividad del sistema también esta relacionada con la formación y la información que han recibido los ocupantes.

- **Efecto del sistema de señalización**

La importancia de los sistemas de señalización esta en reducir el retraso que puede producir el hecho que los ocupantes deban buscar la salida y en general la vía de evacuación que les conduzca a un área segura. Este proceso es especialmente importante en edificios que dispongan de una configuración irregular y los ocupantes no estén absolutamente familiarizados con el mismo. El sistema de

señalización debe tener la capacidad de guiar a las personas hacia las salidas de forma simple e inmediata. Debe mantener su capacidad aún en condiciones de iluminación deficiente como es el caso de oscuridad natural o bien la producida por la existencia de humo o polvaredas. En edificios ocupados por gran número de personas, los sistemas de señalización deben constituir un sistema absolutamente complementario a cualquier otra información que pudiera suministrarse a los ocupantes durante el proceso de la evacuación.

Es importante señalar que el sistema de señalización, a pesar de ser indispensable, puede producir demoras al inicio del proceso o bien en puntos intermedios de las vías de evacuación. Es determinante estimar el tiempo que se tardan los ocupantes en seleccionar un recorrido o una salida (pero dicha estimación puede ser sumamente difícil de evaluar).

- **Influencia del tipo de edificio**

El tipo de edificio en el cual se produce el incidente es un factor determinante. No es lo mismo que un incidente se produzca en un centro residencial, en un edificio de oficinas, en una fábrica, en un cine, en un centro escolar, en un recinto deportivo o en una discoteca. La situación es distinta fundamentalmente por las actuaciones que se generan y las relaciones que existen o se establecen entre los individuos afectados por el incidente. En edificios de viviendas, centros escolares o industriales existe una determinada estructura social y organizativa. Mientras que, en otros casos como recintos deportivos o de espectáculos ésta estructura organizativa no existe o es muy ambigua. Entonces al tratar de estudiar evacuaciones de emergencia, deberían pronosticarse éstas posibles situaciones para identificar si las actuaciones serán individuales o existirán grupos de actuación.

Se pueden mencionar dos tipos de organizaciones de acuerdo a las actuaciones en determinados tipos de edificios: entornos familiares y entornos públicos. En un entorno familiar debe pensarse en actuaciones de grupo difícilmente controlados por otras jerarquías organizativas y desplazamientos más lentos a causa de la actuación en grupo, mientras que en un entorno público hay que pensar en individuos supeditados o no a una organización formal. En el segundo caso,

cuando existen procedimientos de evacuación escritos e implantados, son estos los que determinan una estructura formal para la actuación en situaciones de emergencia.

- **Efecto de la familiaridad con el recinto y el sexo de los ocupantes en la previsión de la conducta**

La familiaridad con el recinto determina ciertas actuaciones. Las personas tienden a utilizar rutas conocidas por su propia experiencia (es poco probable que los ocupantes utilicen rutas desconocidas en una evacuación de emergencia). Por otro lado, resulta imprescindible la abertura de puertas que conducen a salidas de emergencia, ya que el porcentaje de ocupantes que intentan abandonar las instalaciones por dichas puertas aumenta significativamente.

Se debe considerar la influencia del sexo de los ocupantes conjuntamente con otros factores. Existen estudios que avalan la naturaleza de las acciones “tipo” que emprenden uno y otro sexo tras percibir una señal de alarma. Estos estudios afirman que el porcentaje de hombres que emprenden actuaciones de acción es mayor, mientras que las actuaciones tomadas por las mujeres se orientan más a la seguridad y a la cooperación.

- **Interacción entre ocupantes**

En la mayoría de los casos un individuo no está aislado, interacciona con los otros miembros del grupo. La interacción entre los ocupantes puede ser física, así en los estudios de Fruins (1993) se determina el espacio vital necesario para que los ocupantes maniobren confortablemente en una muchedumbre o aglomeración. La existencia de este espacio es fundamental para que no existan conflictos ni se produzcan variaciones en la velocidad y en la dirección de la circulación. Esta interacción también puede ser social, de forma que se formen grupos que a su vez pueden propiciar actuaciones inapropiadas. En la evacuación de edificios industriales y de centros escolares, se observa la formación de grupos, en muchos casos rompiendo el propio grupo natural de actividad y formándose grupos distintos por otras razones, posiblemente de amistad.

Procedimientos formales

Los procedimientos formales contemplan la incidencia en el proceso de la evacuación del edificio de aspectos organizativos, como la existencia de procedimientos establecidos y conocidos por los ocupantes que deben dar lugar a actuaciones planificadas que buscan disminuir la improvisación en estas situaciones.

La existencia de procedimientos formales debe mejorar las condiciones de evacuación de cualquier edificio. Deben servir para reducir los tiempos de reacción y demora, y es de esperar que los ocupantes identifiquen la señal de alarma y reaccionen de forma inmediata a la misma. El manual de evacuación es un documento en el cual, a partir de las condiciones del edificio y las características de los ocupantes, se establecen estrategias de evacuación en función de la ocupación y de la contingencia que se haya producido. Puede constituir un documento independiente, sin embargo, en muchos casos se integra en un documento más general denominado “Plan de emergencia” o “Manual de autoprotección”.

2.3.2 Comportamiento de los Ocupantes

Respecto al comportamiento de las personas, son de gran importancia los conceptos de pánico y pánico negativo. El pánico es una conducta humana autodestructiva caracterizada por tomar decisiones irracionales que incrementan el peligro para ellas mismas y las demás. Cuando en una situación de peligro existen personas que padecen de pánico, pueden aparecer un número mayor de víctimas que aquellas que causaría el siniestro por sí sólo. El pánico negativo consiste en una actitud completamente inmovilista e insensible al siniestro, llevada de tal forma que como consecuencia de la pasividad total puede terminar necesariamente en la autodestrucción.

2.3.3 Magnitudes presentes en la ocupación de los recintos y el movimiento de las personas

Las zonas ocupadas por las personas en los edificios, tienen una determinada capacidad que depende de las dimensiones de las mismas y de la separación que se establezca entre ellas. Es diferente un recinto ocupado por niños que por personas adultas, pero además

las personas ejercen a su alrededor una zona de influencia, en la cual desean que no se encuentren otras personas desplazándose para obtener dicho espacio.

Las magnitudes más utilizadas para definir la ocupación de los recintos son: densidad, módulo y tasa de ocupación (Casadesús, 2005).

- **La densidad de ocupación** indica el número de personas que se encuentran en una unidad de superficie. Si la unidad de superficie utilizada es el m^2 (metro cuadrado), las unidades de esta magnitud serán personas por m^2 .
- **El módulo de ocupación** indica las unidades de superficie que le corresponden a una persona que ocupa un determinado recinto. Es la magnitud inversa de la densidad, siendo sus unidades m^2 por persona.
- **La tasa de ocupación** muestra la relación entre la ocupación existente en un recinto y su posible ocupación máxima, se trata de un número adimensional que corresponde al porcentaje de ocupación.

De igual forma, pueden definirse magnitudes de circulación como la velocidad de circulación:

- **La velocidad de circulación** se refiere a la distancia recorrida por una persona en una unidad de tiempo. Las unidades de tiempo utilizadas son los minutos o los segundos, dando lugar a unidades de metros por minuto y metros por segundo.

2.3.4 Tiempos de evacuación

En el desalojo de un recinto o un edificio se consideran cuatro tiempos diferenciados: detección, alarma, retardo y evacuación (Casadesús, 2005).

- **Tiempo total de evacuación:** es el que transcurre desde que se produce la detección de un incidente hasta que ha finalizado el proceso de la evacuación. Viene dado por la suma de los tiempos de detección, alarma, retardo y el propio de la evacuación. Para la optimización del tiempo total de evacuación se debe considerar la forma de hacer mínimos todos y cada uno de los tiempos, lo que

depende del número de salidas del edificio o recinto a evacuar y del recorrido que sea preciso efectuar. Normalmente se considera que los ocupantes asignados a una salida deben poder traspasarla en un tiempo máximo de 2,5 segundos.

- **Tiempo de detección:** comprende el tiempo transcurrido desde el inicio de la situación de emergencia hasta que se genera la señal de alarma. Se divide a su vez en tres tiempos: percepción, verificación de la emergencia y aviso para iniciar la alarma. La percepción de la situación de emergencia puede producirse mediante sistemas de detección automáticos o por detección humana. En el caso de detección automática la central de alarma puede activar directamente la alarma para iniciar la evacuación. Este sistema puede utilizarse en función de su fiabilidad (si de forma repetida produjera falsas alarmas resultaría un sistema no utilizable). En caso contrario, la detección humana al no ser rápida puede optimizarse con la ayuda de medios de comunicación eficaces. Normalmente transcurre un tiempo desde que se verifica la gravedad del suceso hasta que se activa la alarma correspondiente.
- **Tiempo de alarma:** es el lapso de la emisión de la señal de alarma, como sirena de alarma, sistemas de megafonía o sistemas ópticos. Este tiempo depende de las habilidades técnicas y la capacidad de comunicación colectiva de los mensajes emitidos.
- **Tiempo de retardo:** es el que transcurre desde que los ocupantes perciben y acatan el mensaje de alarma hasta que inician el movimiento hacia los sitios correspondientes de salida. Influye en él de manera importante, la comunicación de los mensajes y la organización del personal de ayuda para la evacuación.

Si se trata de realizar un estudio en el cual sólo sea considerado el tiempo en el que se inicia el movimiento para la evacuación hasta que se alcanza la salida del edificio, éste será considerado como el tiempo total de evacuación.

2.3.5 Términos de evacuación

Algunos términos utilizados en el estudio de la evacuación de personas de edificios que definen aspectos generales, salidas y comportamientos ante situaciones de emergencia, se mencionan a continuación:

- **Origen de evacuación:** se refiere a cualquier punto que puede estar ocupado por alguna persona. Por lo general en los recintos de densidad de ocupación baja y superficie menor a 50 m^2 se considerar como origen de evacuación su puerta de salida.
- **Vía de evacuación:** constituye el conjunto de dependencias recorridas por los ocupantes desde un punto inicial llamado origen de evacuación hasta un destino seguro.
- **Recorrido de evacuación:** es la distancia existente entre dos puntos de una vía de evacuación, medido sobre el eje de pasillos, escaleras y rampas.
- **Altura de evacuación:** viene dada por la diferencia de cota existente entre el origen de evacuación y la de salida del edificio o espacio exterior seguro, en recorrido ascendente o descendente. De forma genérica se considera un edificio de gran magnitud, a una construcción con una altura edificada superior a 25 metros.
- **Espacio exterior seguro:** es aquella zona cuya superficie es suficiente para contener a los ocupantes y no verse afectados por el siniestro.
- **Rampas:** son los pasillos con una pendiente no mayor del 12% cuando su longitud sea menor que 3 metros, del 10% cuando su longitud sea menor que 10 metros o del 8% en el resto de los casos.
- **Salida del recinto:** es una puerta o paso que conduce directamente o no a la salida de la planta o del edificio.
- **Salida de planta:** puede ser el arranque de una escalera que conduce a una planta de salida del edificio siempre que reúna unas condiciones de seguridad establecidas; también puede tratarse de una puerta de acceso a una escalera o

a un pasillo protegido, siempre que cumpla con la normativa específica y que conduzca a la salida de edificio. De igual forma, puede hablarse de salida de planta en el caso de puertas de acceso a otro sector, con la condición de que el primer sector tenga otra salida de planta o una puerta de acceso a un tercer sector y finalmente a una salida de edificio, en cuyo caso las salidas del primer sector no conducirán a un sector común para los dos recorridos opcionales.

- **Salida de edificio:** puede ser cualquier puerta utilizable como paso a un espacio exterior seguro.
- **Simulacros de evacuación:** son un ejercicio en el cual los ocupantes de un edificio se desplazan de la posición que ocupan en el interior del mismo hasta una posición segura tratando de reproducir la forma como lo realizarían en una situación de emergencia, pudiendo estar o no avisados, con lo que desconocen si se trata de una situación real o de un simulacro.
- **Ensayos de evacuación:** son aquellos ejercicios en los cuales un grupo de personas se desplaza desde el interior de un edificio o de un recinto hasta otra dependencia o espacio exterior. Esto permite observar actitudes y medir ciertas magnitudes como pueden ser el tiempo de evacuación, las densidades de ocupación y las posibles retenciones. Dichas mediciones pueden realizarse directamente o procediendo a la grabación del ensayo y posterior análisis del mismo.

2.4 Tipos de modelos para simular las condiciones de un espacio y la dinámica de sus ocupantes

Existen diversas formas de modelar y simular las condiciones de un espacio y la dinámica de las personas que lo habitan cuando se lleva a cabo un desalojo o un proceso de evacuación. Los modelos más conocidos son:

- **Modelos realizados con autómatas celulares**

Un autómata celular es un sistema dinámico que evoluciona en pasos discretos. Se trata de varias retículas superpuestas llamadas capas que forman una malla

contenedora de celdas que se conocen como células. El estado de una celda lo conforman el conjunto de valores que las capas tienen en la posición de la misma. Cada una de las celdas pertenecientes al autómata actualiza su estado en un intervalo de tiempo seleccionado por el modelista y dicha actualización es realizada una vez que han sido recorridas todas las celdas del autómata. Modelar una regla de actualización para un autómata celular consiste en una actualización de estado que se realiza en cada una de las celdas en función de sus características y el de sus celdas vecinas (Laffaille, 2005). Con estas características los modelos de sistemas espacialmente extendidos, resultan ser simples y claros de realizar. Por otro lado, para simular el movimiento de personas tienen algunas desventajas, entre las cuales se mencionan:

- **Rigidez del espacio:** la forma de los límites físicos que envuelven un espacio deberá adaptarse a la retícula con la que se realiza el modelo, por lo tanto una pared inclinada consistirá en un conjunto de celdas con determinado estado que se acercan a modelar la forma del cerramiento pero seguirán siendo celdas alineadas de acuerdo a la inclinación en el plano del cerramiento.
- **El barrido de las celdas:** de acuerdo a como se realice el barrido de las celdas para realizar la actualización de estados, puede que algunas posean prioridad en el momento de acceder a una celda vacía o a una salida.
- **Individuos no diferenciables:** en los modelos de autómatas celulares no existen objetos que se desplacen a través de las celdas, sólo ocurren cambios de estado en las celdas. Esto hace que no sea posible seguir el recorrido de una persona dentro de la simulación.

- **Modelos realizados con ecuaciones diferenciales**

Los sistemas de ecuaciones diferenciales permiten modelar el espacio y el tiempo como variables continuas. La actualización de sus variables se realiza por medio de ecuaciones que son calculadas en intervalos cortos para que no se dejen de registrar eventos ocurridos durante la simulación (Laffaille, 2005). Al momento

de modelar un desalojo mediante este tipo de modelos se consiguen las siguientes desventajas:

- **Humanos como partículas de un fluido:** el movimiento de personas mediante ecuaciones diferenciales es visto como un conjunto que representa un fluido que obedece a reglas descritas por medio de las ecuaciones propuestas. Esto no es precisamente lo que ocurre en la realidad, puesto que en un conjunto de individuos pueden presentarse tanto comportamientos diferentes como individuos distintos.
- **Complejidad del modelo y su resolución:** las ecuaciones que definen estos modelos son complejas, generando gran dificultad para comprender, plantear y resolver problemas.
- **Individuos no diferenciables:** a través de ecuaciones diferenciales no se puede tratar a cada persona de forma individual y no se puede determinar cuál fue el recorrido de uno de los individuos durante la simulación, debido a que al ser considerado como un fluido se trata a todas las personas como partículas que se rigen por reglas sin diferenciar unas de otras.

• Modelos realizados con redes de flujo

Las redes de flujo son modelos matemáticos aplicables a situaciones tales como: sistemas de tuberías (para fluidos como agua, petróleo o gas), redes de cableado eléctrico, sistemas de carreteras, sistemas de transporte de mercancías, procesos de movimientos de evacuación, entre otros. Una red de flujo es vista como un grafo dirigido, donde la fuente es quien inicia el traspaso de algún material o producto por los arcos (camino). Es tomada en cuenta la ley de corrientes de *Kirchoff*, donde la suma de flujos entrantes a un vértice debe ser igual a la suma de flujos saliendo del vértice. La utilización de este modelo matemático fue planteada por Berlin (1980) en sus investigaciones en el “*Center for Fire Research del National Bureau of Standards*”. Mediante la red de flujo, el edificio se representa a través de un conjunto de puntos que constituyen los nodos, y las líneas que establecen las conexiones entre los mismos definen los arcos. Los nodos

se sitúan en el centro de las dependencias, mientras que los arcos representan el desplazamiento de un nodo a otro y cada recorrido tiene un costo que se mide en unidades de tiempo; el tiempo necesario para desplazarse desde un nodo origen hasta un nodo destino. Las rutas de evacuación constituyen los caminos en la red. En el modelo dinámico se consideran T períodos de tiempo, y para cada nodo del modelo estático se construyen $T+1$ copias del nodo, conectadas mediante flechas y numeradas de forma consecutiva. También se sitúan los arcos correspondientes a los recorridos, de los cuales se efectúan las respectivas réplicas. Una característica de esta representación es que permite representar la evolución de determinadas magnitudes período a período.

2.5 Modelado y simulación de la evacuación de un edificio usando SMA

El modelado del movimiento de personas usando sistemas multiagente consiste en representar por medio de agentes móviles y reactivos los diferentes actores que intervienen en la dinámica de un desalojo, como por ejemplo, las señales de emergencia, los rescatistas, los ocupantes, entre otros. El entorno de desarrollo del sistema estará representado por el espacio en donde se lleva a cabo la interacción entre los diferentes tipos de agentes. La representación de dichos agentes y del espacio en que se desenvuelven se realiza utilizando metodologías y plataformas de desarrollo de SMA, soportados por algún lenguaje de programación. Pero antes de llegar a la etapa del desarrollo del modelo, se debe describir en detalle cuál es el sistema que se quiere modelar, comenzando con la determinación de los actores que van a participar y de las características que le permitan interactuar y tomar decisiones.

2.5.1 Metodologías y plataformas de desarrollo de SMA

Las metodologías representan las etapas que permiten a los modelistas y diseñadores tener guías sobre el desarrollo de un SMA, partiendo de una definición de alto nivel hasta llegar a una implementación. En la actualidad existe una gran variedad de

técnicas que coinciden en ciertas características básicas, pero poseen capacidades diferentes y están orientadas a distintos escenarios.

Entre las metodologías y plataformas de desarrollo de SMA consultadas, se encuentran pocas relacionadas al modelado y simulación de espacios y la dinámica de sus ocupantes. Por lo general son plataformas desarrolladas para un proyecto específico que no se encuentran bajo libre disposición, tal es el caso de *SIFBUP S*, *SIMULEX*, *EXODUS*, entre otros. No obstante, existe un número importante de herramientas de software libre para desarrollar distintas aplicaciones bajo el contexto de SMA que serán mencionadas más adelante.

En torno a las metodologías que permiten desarrollar SMA, se encuentran las siguientes:

- **Método de Burmeister** Burmeister (1996). Este método especifica tres modelos para el análisis orientado a los agentes de un sistema. El método está basado en técnicas orientadas a objetos. Introduce elementos claves a detectar y modelar en el proceso de desarrollo de un SMA como son: organización, agentes e interacción.
- **MAS-CommonKADS** Iglesias (1998). Esta basada en *CommonKADS* Schreiber (2000), aportando una serie de modelos para desarrollar las fases de análisis y de diseño de SMA. Esta metodología define el sistema empleando siete modelos diferentes, cada uno de los cuales está basado en una teoría distinta. Estos modelos son: agente, tareas, experiencia, coordinación, comunicación, organización y diseño.
- **GAIA** Wooldridge *et al.* (1998) y Wooldridge *et al.* (2000). Esta metodología se centra en la construcción de sistemas basados en agentes como un proceso de diseño organizacional. Los dominios considerados por la metodología como roles, responsabilidades e interacciones, tienen las siguientes características: los agentes son heterogéneos, la estructura de organización del sistema es estática, las habilidades de los agentes y sus servicios son estáticos y no cambian en tiempo de ejecución, y por último emplea un número manejable de agentes.

- **DESIRE** Brazier *et al.* (1997). Constituye un entorno altamente expresivo para permitir a los diseñadores de SMA centrarse en el diseño conceptual y la especificación de su sistema. El entorno de modelización de alto nivel de *DESIRE* permite automáticamente generar prototipos de aplicaciones directamente desde la especificación.
- **MASSIVE** (*Multi-Agent SystemS Iterative View Engineering*) Lind (1999). Esta constituido por un conjunto de vistas diferentes del sistema a construir donde el desarrollo que se sigue consiste en una visión iterativa del mismo. En él se combinan procesos de reingeniería junto con un método en cascada mejorado que permite realizar refinamientos.
- **Tropos** Castro *et al.* (2002). Se trata de una metodología de desarrollo de software basado en agentes mediante extensiones de UML. El concepto principal sobre el que se desarrolla el proceso de análisis y modelado es el de actor, así como sus objetivos y posibles dependencias con otros actores.
- **MaSE** (*Multiagent System Engineering*) Wood (2000). Esta metodología busca cubrir todas las etapas en el proceso de construcción de un SMA, partiendo de la especificación del mismo hasta su implementación. Dispone de una herramienta de desarrollo denominada *AgentTool* que abriga la totalidad de fases de la metodología.
- **MESSAGE** (*Methodology for Engineering Systems of Software Agents*) EU-RESCOM (2000). Es una metodología orientada a agentes que incorpora técnicas de ingeniería del software cubriendo el análisis y diseño de SMA. La metodología provee un lenguaje, un método y unas guías de cómo aplicarla, centrándose en las fases de análisis y diseño, y lanzando ideas sobre el resto de etapas como implementación, pruebas e implantación.
- **BDI** (*Beliefs, Desires, Intentions*). Las arquitecturas BDI se inspiran en un modelo cognitivo del ser humano. Los agentes utilizan un modelo del mundo, una representación de cómo se les muestra el entorno. El agente recibe estímulos a través de sensores ubicados en el mundo. Estos estímulos modifican el modelo

del mundo que tiene el agente (representado por un conjunto de creencias). Para guiar sus acciones, el agente tiene Deseos. Un deseo es un estado que el agente quiere alcanzar a través de intenciones.

Por otro parte, las plataformas de desarrollo de SMA permiten el diseño, implementación y ejecución de agentes autónomos, así como la organización de los mismos. Las herramientas más conocidas, algunas dentro del mundo del software libre, utilizadas para el modelado y simulación de SMA en distintas áreas de investigación son: *JADE*, *MADKit*, *Zeus*, *NetLogo*, *JAFMAS* y *JACK*. También se destaca una plataforma llamada GALATEA (desarrollada en la Universidad de los Andes, Mérida - Venezuela), que a través de su librería gSpaces, permite simular un espacio y ejecutar en él procesos de desalojo utilizando agentes.

- **JACK.** Provee un entorno de desarrollo orientado a agentes construido sobre *java* y completamente integrado con este lenguaje de programación. Incluye todas las componentes del entorno de desarrollo de *java*, y también las siguientes extensiones para implementar el comportamiento de los agentes: define nuevas clases base, interfaces y métodos, provee extensiones a la sintaxis de *java* para soportar clases orientadas a agentes y provee extensiones semánticas para soportar la ejecución del modelo.
- **MADKit.** Es una plataforma multiagente para desarrollar y ejecutar aplicaciones basadas en un paradigma orientado a la organización. Este paradigma utiliza a los grupos y los roles como base para construir aplicaciones complejas. MADKit no está asociado a ninguna arquitectura de agentes en particular, permitiendo a los usuarios de esta plataforma implementar libremente sus propias arquitecturas.
- **ZEUS.** Es una herramienta para construir aplicaciones multiagente colaborativas que provee un entorno integrado para el desarrollo rápido de sistemas. Se trata de una metodología de diseño de SMA soportado por un entorno visual para capturar las especificaciones de los agentes.

La descripción de estas tres primeras herramientas fue extraída del artículo titulado "*Evaluación de Plataformas para el Desarrollo de Sistemas Multiagente*", desarrollado por Marchetti y García (2003).

- **NETLOGO** Wilensky (1999). Es una herramienta que facilita la construcción de SMA con un elevado número de agentes y todos pueden estar en ejecución a la vez. Esta construido sobre *java* y es la última generación de una serie de lenguajes de modelado multiagente que comienza con *StarLogo*.
- **JADE** (*Java Agent Development Framework*) Bellifemine *et al.* (2007). Es un entorno que simplifica la implementación de SMA en base a las especificaciones *FIPA*. La plataforma puede ser distribuida en varias máquinas (las cuales no necesitan compartir el mismo sistema operativo) y la configuración puede ser controlada mediante una interfaz gráfica remota, pudiendo incluso ser cambiada en tiempo de ejecución moviendo agentes de una máquina a otra, cuando sea necesario.
- **JAFMAS** (*Java Framework for Multi-agent Systems*) Marchetti y García (2003). Provee una metodología genérica para desarrollar SMA basados en los actos del habla junto con un conjunto de clases para soportar la implementación de estos agentes en *java*. La intención del *framework* es inducir a los desarrolladores principiantes y expertos a estructurar sus ideas en aplicaciones de agentes concretas.
- **GALATEA** (*GLIDER with Autonomous Logic-based Agents, TEmporal reasoning and Abduction*) (Dávila *et al.*, 2004). Es un software de simulación que propone integrar en una misma plataforma computacional, las herramientas conceptuales y concretas para simulación de: eventos discretos, sistemas continuos y sistemas multiagente; de forma distribuida e interactiva. Es decir, proporcionar un ambiente de modelado y simulación de agentes que permite explorar alternativas para su integración con un formalismo general de modelado y simulación de eventos discretos.

Para este estudio se seleccionó a GALATEA como plataforma para el desarrollo

del modelo. Esta herramienta presenta aplicaciones en el área del modelado y simulación del desalojo de personas en determinados espacios mediante SMA. La aplicación más importante se refleja en el estudio de desalojo realizado a un sector de la Universidad Central de Venezuela, empleando la librería gSpaces (Laffaille *et al.*, 2005). Los códigos fuentes de GALATEA están alojados en *sourceforge.net*, un repositorio de código abierto, el cual provee servicios sin costo que facilitan compartir las fuentes con una audiencia global. En la siguiente sección se explicará con mayor detalle el funcionamiento de esta plataforma.

2.6 GALATEA

GALATEA es un software para simulación de SMA. Es el producto de dos líneas de investigación: lenguajes de simulación basados en la teoría de simulación de Zeigler y agentes basados en lógica. En términos generales, se trata de una colección de software para simular sobre modelos escritos en lenguajes de diversa naturaleza: procedimental, orientada a los objetos, dinámica de sistemas y orientación a los agentes. Con GALATEA se integra en la misma plataforma de simulación, herramientas conceptuales y concretas para simulación multiagente, distribuida, interactiva, continua y discreta.

GALATEA es un descendiente directo de *GLIDER*, un simulador de eventos discretos (*DEVS*) desarrollado en la Universidad de Los Andes, Mérida - Venezuela, que incorpora herramientas para modelado continuo. En GALATEA se combina a *GLIDER* con una familia de lenguajes de programación lógica, específicamente diseñados para el modelado de agentes. Al soportar simulación *DEVS* puede ser usada para modelar sistemas continuos reduciendo la simulación continua a un discreto por medio de un paso de simulación muy pequeño.

2.6.1 Diseño

La arquitectura de GALATEA esta basada en objetos. Tanto los agentes como el simulador principal están diseñados de acuerdo a la orientación por objetos, la modularidad, la escalabilidad y la interactividad. Se trata de una plataforma flexible desde el

punto de vista de ingeniería de software basado en un conjunto de lenguajes amigables de modelado con la suficiente expresividad, que permita a los modelistas describir un SMA de una manera que haga viable su simulación; esta posibilidad es críticamente dependiente del dominio y de tipo específico de aplicación.

GALATEA permite a los modelistas describir sistemas que incluyen agentes y sistemas donde no todo es un agente, y en los cuales las técnicas tradicionales de modelado de eventos discretos y continuos son suficientes para la mayoría de los propósitos. Esta plataforma esta desarrollada en *java* y su estructura esta conformada por siete directorios correspondientes a:

- */bin - ejecutables*
- */config - configurations*
- */demos - samples*
- */doc - documentations*
- */galatea - sources*
- */images - images*
- */lib - external libraries*

GALATEA cuenta con ocho librerías o paquetes. El núcleo incluye el motor de simulación de eventos discretos (*GLIDER*), el marco de trabajo HLA (*hla*), las herramientas para simulación continua (*gode*) y multiagentes (*glorias*), el traductor *galatea-java* (*gcompiler*) y la interfaz gráfica de usuario (*ggui*) como parte del ambiente integrado de desarrollo y las herramientas de integración de sistemas de información geográfica (*ggis*) y de diseños urbanos arquitectónicos (*gspaces*).

2.6.2 Librería gSpaces

gSpaces es una librería que permite desarrollar modelos que simulan, entre otras cosas, el desalojo de espacios arquitectónicos o urbanos. Puede decirse que es un meta modelo

porque se han modelado cualidades tanto de los espacios como de los agentes; posteriormente el modelista se encarga de crear un modelo particular con las cualidades que desea estudiar. La librería gSpaces esta basada en el formalismo de simulación de eventos discretos *DEVS* y combina una descripción completa del espacio con un tratamiento discreto de la interacción agente-agente y agente-ambiente (Laffaille *et al.*, 2006).

Esta librería posee las siguientes características:

- **Espacio semicontinuo o híbrido.** El espacio esta dividido en unidades espaciales y es concebido como un plano donde las coordenadas son continuas dentro de los ejes de coordenadas x e y . De esta forma tanto la velocidad con la que se desplaza un agente como su posición son continuas, pero la manera en la que el entorno influye en cada agente depende de las unidades espaciales discretas en las que se dividió el espacio. Esta cualidad permite discretizar algunas de las variables y que otras continúen conservando continuidad.
- **Tiempo continuo con avance discreto.** El tiempo es una variable continua que se incrementa en instantes discretos. Las variables y los estados del sistema son evaluados y actualizados en esos instantes. Esta forma de modelar el tiempo se enmarca dentro del paradigma de modelado y simulación de eventos discretos sobre el cual se basa GALATEA.
- **Estado con variaciones discretas.** Los eventos que se producen en el modelo son instantáneos. Esto hace que cada vez que un agente actualiza su posición, cambie sus coordenadas x , y en forma instantánea. Por otra parte, la posición de ningún agente cambia mientras no haya un evento que provoque el cambio.
- **Determinístico o Probabilístico.** Diferentes realizaciones de un mismo experimento con las mismas condiciones iniciales generan la misma salida si no se incluyen variables aleatorias en el modelo, pero en caso de tener alguna variable aleatoria el comportamiento del modelo será estocástico.
- **Individuos diferenciables con comportamientos particulares.** En gSpaces

cada uno de los agentes es una entidad completamente diferenciable con características particulares y con la posibilidad de comportarse de una manera diferente con respecto al resto de agentes que se encuentran en la simulación. Los agentes están basados en los mensajes de GALATEA donde cada uno es un objeto distinto con valores particulares para sus características que pueden variar durante la ejecución de la simulación. La conducta de una persona puede asociarse a sus características, permitiendo de esta manera que existan diferentes tipos de personas con diferentes conductas en un mismo modelo. También se le pueden agregar nuevos atributos en caso de ser necesario. Debido a que son entidades diferenciables pueden comportarse de manera diferente ante un mismo estado del sistema si el modelista así lo contempla.

- **Espacio modificable.** En gSpaces existe la posibilidad de hacer que los espacios cambien sus características iniciales en tiempo de ejecución del sistema.

Meta - Modelo de gSpaces

Además de las características propias de los mensajes de GALATEA, los agentes en gSpaces, como se mencionó anteriormente, poseen los campos x e y que representan sus coordenadas en el espacio, pero se suman: la velocidad instantánea Vx y Vy , la visibilidad que representa la distancia a la que un agente puede percibir una puerta, y la dirección hacia la que se dirige. Los modelos de diseños arquitectónicos o urbanos son divididos en *Spaces*. Cada *Space* contiene: una lista de agentes que se encuentran dentro de él, una lista de segmentos que representan sus paredes, una lista de segmentos que representan sus puertas y un punto en el interior del espacio que permite definir si cualquier otro punto está dentro o fuera de él. Un *Space* es modelado como un plano continuo dividido en unidades espaciales llamadas celdas. Las celdas son cuadradas y la longitud del lado es seleccionada por el modelista. Dichas celdas tienen un conjunto de variables que pueden ser necesarias para actualizar la posición de los agentes que están dentro de ellas, como por ejemplo: lista de paredes, lista de puertas, ordenada de acuerdo a la distancia más corta hacia cada una de ellas, la cantidad de agentes dentro de la celda y el índice de obstáculos del espacio que la contiene. Una de las principales suposiciones hechas al modelar con gSpaces consiste en que todos los agentes

que se encuentran dentro de una celda son influenciados por el ambiente de la misma manera, es decir, la influencia del ambiente no hace diferencia entre agentes que están dentro de una misma celda aunque sus posiciones sean diferentes. No obstante, cada agente puede comportarse de manera diferente porque tiene una serie de campos que lo diferencian de otros. Las paredes son segmentos rectos impenetrables definidos por puntos de coordenadas x e y . Cada *Space* tiene una lista de paredes que restringen el movimiento de las personas dentro de él. Se pueden agregar paredes o eliminarlas durante la ejecución del modelo, permitiendo simular eventos que pueden cambiar las características de los espacios arquitectónicos o urbanos.

Los *Spaces* también poseen una lista de puertas. Una puerta es un segmento que permite a las personas salir de un espacio y dirigirse a otro o a la salida general del modelo. Al igual que las paredes, se pueden agregar o eliminar puertas durante la ejecución del modelo. Las puertas se caracterizan por: la cantidad de las personas que pueden atravesarla en un mismo instante de tiempo, el tiempo que una persona necesita para cruzarla, y una bandera que indica si la puerta es bidireccional o unidireccional. Una puerta bidireccional está conformada por dos nodos, uno en cada *Space* que es conectado a través de ella. Las puertas son herederas de los nodos recurso, *resource* de GALATEA y poseen todas las cualidades de los mismos. El movimiento de los agentes se modela por medio de un método llamado *move*. Un *Space* tiene algunos métodos de movimiento simples, pero es posible crear nuevos. El método calcula la nueva posición para cada agente dentro de la celda. Para hacer el cálculo, el método *move* puede usar los atributos del agente como su posición anterior y la velocidad, así como toda la información proporcionada por la celda. Para que sea efectuado el movimiento dentro de un espacio se debe generar su activación por un evento de GALATEA. Cuando un espacio es activado sus celdas son recorridas de manera aleatoria y el método *move* es invocado por cada agente que se encuentra dentro de la celda. Si el movimiento ocurre de manera normal, es decir, si el agente al moverse no intercepta paredes o puertas su nueva posición vendrá dada por:

$$\begin{aligned}x_0 &= x + V_x \Delta t \\ y_0 &= y + V_y \Delta t\end{aligned}\tag{2.1}$$

Donde (x_0, y_0) será la posición final de los agentes; (x, y) es la posición actual; Δt es el intervalo de tiempo entre activaciones del espacio y (Vx, Vy) es la velocidad lineal calculada por el método *move*. Para verificar si el desplazamiento del agente es normal o no, los *Spaces* verifican si existe cualquier intersección entre el segmento $((x_0, y_0); (x, y))$ y cada pared. Si existen una o más intersecciones, más cercanas que la posición final (x_0, y_0) , el agente se mueve a la intersección más cercana a la posición original (x, y) . Si la intersección ocurre con una puerta y la puerta posee capacidad para recibir a dicho agente, éste le es enviado y un evento de activación de la puerta es programado en la lista de eventos futuros de GALATEA según el retraso de la puerta. Cuando la puerta es activada, todos los agentes en la puerta que hayan cumplido su tiempo de retraso son enviados a otro *Space* o a una salida según el modelo. Como se trata de un módulo, los componentes del gSpaces pueden ser usados con los otros componentes de GALATEA para desarrollar modelos más complejos y sofisticados.

Codificación de un modelo en gSpaces

Un modelo de gSpaces esta fundamentado en GALATEA que es la plataforma de simulación que soporta a la librería. GALATEA esta basada en objetos y agentes, y corresponde al estilo de modelado orientado a la red, ya que los componentes del sistema modelado son organizados en redes de nodos que intercambian mensajes.

En la figura 2.2 se puede observar el espacio que será modelado con la finalidad de explicar con un ejemplo el funcionamiento de gSpaces. Entre las habitaciones hay dos puertas; las flechas indican su dirección. En la izquierda hay una puerta bidireccional para salir o entrar. Los círculos y los cuadros representan los tipos de agentes

Existen tres nodos que son parte fundamental de la construcción del modelo como son el *Display*, *exit* y *MobileAg*.

```
public static Display display = new Display("Display", 0.3);
public static Node exit = new Node("Exit", 'E');
public static MobileAg mobileAg = new MobileAg("MobileAg", 0.5, 1, 2);
```

El nodo *Display* es el encargado de dibujar la dinámica que ocurre en el sistema. Este nodo es heredero del *Autonomous* de GALATEA y su función es mostrar las

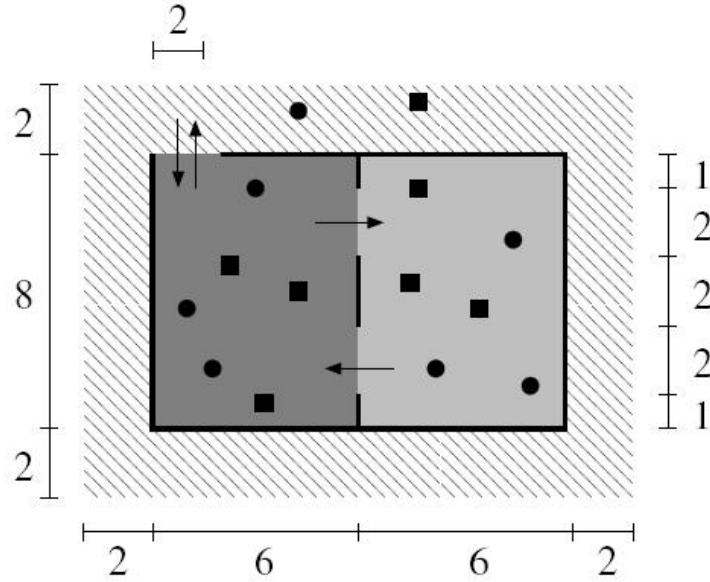


Figura 2.2: Espacio formado por dos habitaciones y un área externa

actualizaciones del modelo de manera gráfica para cada paso de simulación que el modelista desee. El código, para incluir este nodo, consta de su constructor y la sentencia para agregarle los espacios. El constructor recibe como parámetros el nombre del nodo y el intervalo de tiempo en el que se refrescará la ventana de animación.

El nodo *exit* es el encargado de eliminar los agentes que dejan de estar dentro del sistema, al salir de los espacios que lo conforman hacia un área, externa a las representadas en el modelo. *Exit* es entonces el nodo que representa la salida general del modelo y se crea con un constructor que recibe como parámetros un nombre y una letra que le indica al simulador el tipo de nodo que debe crearse. Puede decirse que un agente será enviado a la salida general del modelo cuando su ubicación dentro de este deja de ser relevante y se considera que debe salir del sistema; por ejemplo, cuando un agente ha desalojado el edificio en estudio y se encuentra lo suficientemente lejos del peligro como para considerarse a salvo.

El nodo *MobileAg* es el creador de todos los agentes que se encontrarán dentro del sistema. Una vez que son creados, los agentes son objetos que recorren la red de nodos pasando de unos a otros en función de reglas propias del sistema a modelar. El constructor de este nodo recibe como parámetros un nombre, la velocidad promedio de

desplazamiento de los agentes, el número inicial de agentes que contendrá el modelo, y el número de tipos de agentes.

Retomando la construcción del modelo mediante gSpaces, al ver la figura 2.2 se puede observar que el espacio se divide a su vez en otros tres subespacios: *Outside*, *LeftRoom* y *RightRoom*. Estos se declaran en el modelo de la siguiente manera:

```
public static Space Outside = new Space("Outside", // Nombre del espacio
    2, // Número inicial de agentes
    1.0, // Coordenada X del punto interno
    1.0, // Coordenada Y del punto interno
    2.0, // Resolución del espacio
    0.1); // Tiempo de paso de simulación

public static Space LeftRoom = new Space("LeftRoom", // Nombre del espacio
    6, // Número inicial de agentes
    4.0, // Coordenada X del punto interno
    4.0, // Coordenada Y del punto interno
    1.0, // Resolución del espacio
    0.1); // Tiempo de paso de simulación

public static Space RightRoom = new Space("RightRoom", // Nombre del espacio
    6, // Número inicial de agentes
    8.0, // Coordenada X del punto interno
    6.0, // Coordenada Y del punto interno
    1.0, // Resolución del espacio
    0.1, // tiempo de paso de simulación
    "MyRule"); // Regla de movimiento del espacio
```

Los parámetros están explicados a modo de comentario en el código de implementación de los espacios del modelo.

El siguiente paso en la construcción del modelo, es la adición de las paredes y puertas a cada uno de las áreas implementadas. Por ejemplo, en el exterior del espacio hay cuatro paredes:

```
Outside.addWall(2.0, 2.0, 14.0, 2.0); // Xo,Yo,Xf,Yf
Outside.addWall(14.0, 2.0, 14.0, 10.0); // Xo,Yo,Xf,Yf
```

```
Outside.addWall(14.0, 10.0, 4.0, 10.0); // Xo,Yo,Xf,Yf
```

```
Outside.addWall(2.0, 10.0, 2.0, 2.0); // Xo,Yo,Xf,Yf
```

En el espacio *LeftRoom* hay cinco paredes:

```
LeftRoom.addWall(2.0, 2.0, 8.0, 2.0); // Xo,Yo,Xf,Yf
```

```
LeftRoom.addWall(8.0, 2.0, 8.0, 7.0); // Xo,Yo,Xf,Yf
```

```
LeftRoom.addWall(8.0, 9.0, 8.0, 10.0); //Xo,Yo,Xf,Yf
```

```
LeftRoom.addWall(8.0, 10.0,4.0, 10.0); //Xo,Yo,Xf,Yf
```

```
LeftRoom.addWall(2.0, 10.0, 2.0, 2.0); // Xo,Yo,Xf,Yf
```

Puede observarse que existen paredes que son compartidas por ambos espacios (*Outside* y *LeftRoom*), pues algunas tienen coordenadas similares.

También es importante mencionar que una de las puertas unidireccionales permite a los agentes moverse desde *RightRoom* hasta *LeftRoom*. Hay cinco puertas en el espacio exterior, una es la puerta bidireccional y compartida con *LeftRoom* y las otras cuatro son las puertas que rodean el exterior del espacio, las cuales sirven para eliminar a los agentes que salen del sistema a través del nodo *exit* de GALATEA. Las puertas son implementadas de la siguiente manera:

```
Outside.addDoor(2.0, 10.0, 4.0, 10.0, LeftRoom, 'B', 1, 0.0, 1);
```

```
Outside.addDoor(0.0, 0.0, 16.0, 0.0, exit, 'U', 10, 0.0, 1);
```

```
Outside.addDoor(16.0, 0.0, 16.0, 12.0, exit, 'U', 10, 0.0, 1);
```

```
Outside.addDoor(16.0, 12.0, 0.0, 12.0, exit, 'U', 10, 0.0, 1);
```

```
Outside.addDoor(0.0, 12.0, 0.0, 0.0, exit, 'U', 10, 0.0, 1);
```

Los parámetros del *addDoor* son: las coordenadas en *x* e *y* iniciales y finales de la puerta, el espacio al que los agentes serán enviados una vez que utilicen la puerta, el tipo de puerta (bidireccional o unidimensional), la capacidad de la puerta, el tiempo necesario para cruzarla, y la probabilidad de selección de esa puerta con respecto a otras.

Las puertas de los otros espacios se añaden de la siguiente forma:

```
LeftRoom.addDoor(8.0, 7.0, 8.0, 9.0,RightRoom,'U',1,0.0, 1);
```

```
RightRoom.addDoor(8.0, 3.0, 8.0, 5.0,LeftRoom,'U',1,0.0, 1);
```

Se debe tener en cuenta que una puerta bidireccional en gSpaces se define en los dos espacios que la comparten. Por su parte, una puerta unidireccional se define en el espacio en que el agente se encuentra al comenzar el movimiento para salir a otro sector.

Una vez que ya han sido agregadas las paredes y puertas de los tres espacios, las celdas del modelo son creadas a través de la siguiente sentencia:

```
Outside.build();
LeftRoom.build();
RightRoom.build();
```

Corresponde ahora, agregar los espacios en los cuales serán creados los agentes del modelo, mediante el nodo *MobileAg*. Existe la posibilidad de crear agentes en todos los espacios o sólo en algunos de ellos.

```
mobileAg.addSpace(Outside);
mobileAg.addSpace(LeftRoom);
mobileAg.addSpace(RightRoom);
```

De igual forma deben agregarse los espacios que serán dibujados por el nodo *Display*. Con la siguiente sentencia, los espacios indicados serán mostrados gráficamente por medio de un *applet* de *java*.

```
display.addSpace(Outside);
display.addSpace(LeftRoom);
display.addSpace(RightRoom);
display.setup();
```

Después de crear todos los nodos pertenecientes al modelo se debe colocar el código que genera las activaciones de los nodos pertenecientes a la red y se tienen que asignar las variables propias del simulador.

```
Glider.setTitle("Desalojo");//Titulo del modelo
```

```
Glider.setTsim(100); //Tiempo de la simulación
Glider.initsem(); //Semilla del generador de números aleatorios
Glider.stat("Desalojo.sta"); //Archivo que almacena estadísticas
Glider.act(MobileAg,0); //Activación del nodo MobileAg
Glider.act(Outside.getMove(),0); //Activacion del espacio Outside
Glider.act(LeftRoom.getMove(),0); //Activacion del espacio LeftRoom
Glider.act(RightRoom.getMove(),0); //Activacion del espacio RightRoom
Glider.act(display, 0); //Activación del display
Glider.process(); //Procesamiento de la red de nodos
```

Para que el simulador pueda ser ejecutado, el archivo *galatea.jar* debe estar incluido en la variable de entorno *CLASSPATH* del sistema operativo. El simulador será activado cada vez que se ejecuten en una máquina virtual de *java*, las clases de GALATEA y gSpaces. Para compilar la clase correspondiente al modelo en una consola o terminal, se utiliza el comando *javac modelo.java*, donde *javac* es el compilador *java* y *modelo.java* es el nombre del archivo donde se programó el modelo. Una vez compilado el modelo se ejecuta la corrida del mismo con la instrucción *java modelo*, con lo que se activará la ventana de animación y se arrojarán los resultados en el archivo de estadísticas dentro del mismo directorio donde se encuentra la clase principal del modelo.

Al ejecutar el modelo utilizado como ejemplo llamado *desalojo.java*, se observa parte del desarrollo de la simulación en la figura 2.3, donde: a) representa el estado inicial de la simulación, b) indica el momento anterior a los acontecimientos que requieren una evacuación, c) muestra parte del proceso de evacuación, d) los agentes más rápidos (círculos) ya están fuera mientras que los otros (cuadrados) permanecen en el espacio.

Otra forma de desarrollar, compilar y ejecutar los modelos creados con gSpaces y GALATEA, es utilizando el ambiente integrado de desarrollo para *java* llamado *NetBeans*, respaldado por la empresa *Sun Microsystems*.

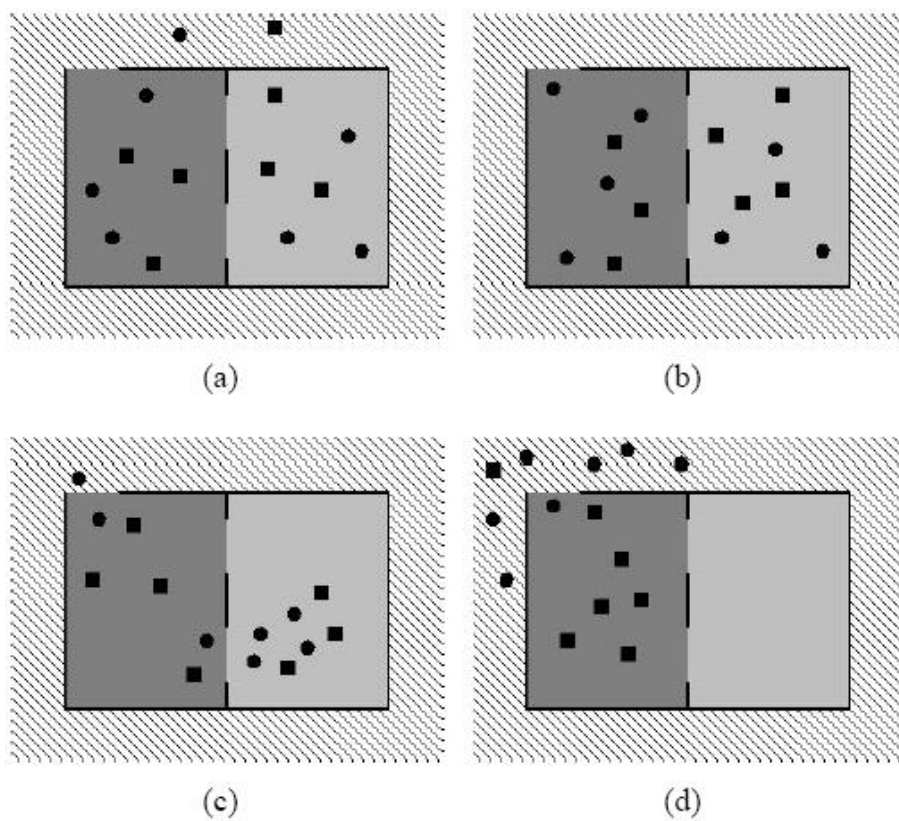


Figura 2.3: Tomas de la simulación del ejemplo

Capítulo 3

Modelado y simulación de la evacuación de personas en un edificio de varios pisos

El proceso de evacuación influenciado por la dinámica de los ocupantes en una edificación puede ser simulado por un SMA, donde sus actores son modelados como agentes móviles y reactivos, cuyas decisiones dependen del entorno en el que se encuentren. La suposición de que las personas en situaciones críticas mantengan un determinado comportamiento, permite estudiar el desarrollo del desalojo de un edificio, siendo posible pronosticar ciertos patrones de conducta, utilizar modelos generales de movimiento y planificar evacuaciones de emergencia como herramientas para reducir el riesgo. La plataforma utilizada es GALATEA, trabajando específicamente con la librería gSpaces, la cual fue objeto de un conjunto de modificaciones para poder llevar a cabo el estudio.

3.1 Descripción del sistema

3.1.1 Descripción del espacio físico

Para desarrollar este proyecto fue seleccionado como modelo una parte del edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes (específicamente el Ala Oeste) ubicado al nor-oeste de la Ciudad de Mérida en el sector de la Hechicera.

La estructura tiene cuatro pisos, con una altura de 4 metros cada uno, totalizando 16 metros, y una extensión de 25.600 metros cuadrados de construcción. Esta edificación se compone de cuatro módulos, unidos a un módulo central que sólo tiene dos niveles y funciona como patio central.

Los cuatro módulos son geoméricamente iguales con algunas variaciones de espacio entre ellos. Su forma es rectangular y se encuentran dispuestos siguiendo la orientación cardinal, asemejándose en planta a la forma de una cruz como se muestra en las figuras 3.1 y 3.2. En su parte central cada módulo posee un espacio vacío, que funciona como entrada de aire y luz.

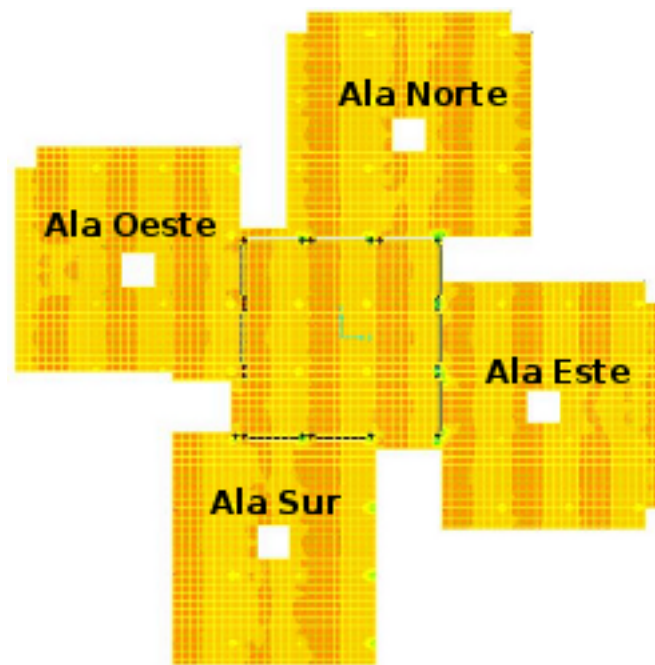


Figura 3.1: Modelo visto en planta de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes

La identificación de estos módulos tiene la siguiente nomenclatura:

- **Ala Norte**

- Nivel Sótano: NS10 - Norte Sótano, número de salón
- Primer Nivel: 1N12 - Piso 1 Norte, número de salón

- Segundo Nivel: 2N01 - Piso 2 Norte, número de salón
- Tercer Nivel: 3N01 - Piso 3 Norte, número de recinto

- **Ala Sur**

- Nivel Sótano: SS10 - Sur Sótano, número de recinto
- Primer Nivel: 1S12 - Piso 1 Sur, número de salón
- Segundo Nivel: 2S01 - Piso 2 Sur, número de salón
- Tercer Nivel: 3S01 - Piso 3 Sur, número de salón

- **Ala Oeste**

- Nivel Sótano: OS10 - Oeste Sótano, número de salón
- Primer Nivel: 1O12 - Piso 1 Oeste, número de salón
- Segundo Nivel: 2O01 - Piso 2 Oeste, número de salón
- Tercer Nivel: 3O16 - Piso 3 Oeste, número de salón

- **Ala Este**

- Nivel Sótano: ES10 - Este Sótano, número de salón
- Primer Nivel: 1E12 - Piso 1 Este, número de salón
- Segundo Nivel: 2E01 - Piso 2 Este, número de salón
- Tercer Nivel: 3E02 - Piso 3 Este, número de salón

En el nivel del módulo del patio central ubicado en el sótano, orientado hacia el oeste, se ubican: un salón de lectura, un salón de clases, un laboratorio y oficinas de los centros de estudiantes. En este proyecto en base a la orientación, se consideran estos espacios como parte del Ala Oeste.

Todos los módulos se componen por un conjunto de dependencias tales como: salones, departamentos, oficinas, laboratorios, baños, auditorios, entre otros. También existen conexiones y escaleras que permiten el libre tránsito entre los distintos niveles, logrando que la estructura funcione como una sola.

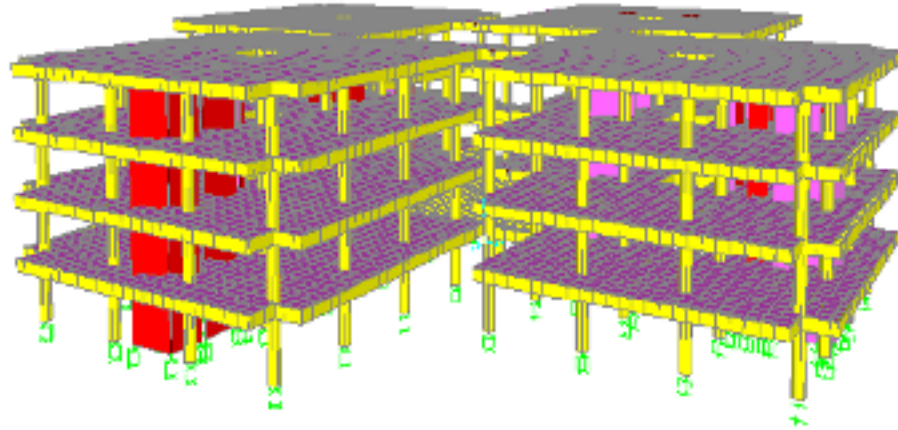


Figura 3.2: Modelo estructural de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes

A continuación se muestra en la tabla 3.1, las dimensiones del edificio especificadas en cada una de sus alas y tomando en cuenta su nivel de elevación.

		Ala Norte	Ala Sur	Ala Oeste	Ala Este
Nivel sótano	Ancho(metros)	36,0	36,0	36,0	36,0
	Largo (metros)	43,8	43,8	60,0	43,8
1er nivel	Ancho(metros)	39,0	39,0	39,0	3,0
	Largo (metros)	43,8	43,8	43,8	43,8
2do nivel	Ancho(metros)	39,0	39,0	39,0	39,0
	Largo (metros)	43,8	43,8	43,8	43,8
3er nivel	Ancho(metros)	42,0	42,0	42,0	42,0
	Largo (metros)	43,8	43,8	43,8	43,8

Tabla 3.1: Medidas de los elementos que conforman el edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes

El edificio en su totalidad cuenta con un número importante de dependencias, tal como se mencionó anteriormente. Por este motivo, es importante tener un registro del número de personas que ocupan los diferentes recintos en distintos intervalos de tiempo.

Esta información sirve para identificar las condiciones de ocupación potencialmente más peligrosas. La tabla 3.2 muestra la ocupación estudiantil de Lunes a Sábado desde las 7:00 a.m. hasta las 7:00 p.m., con un total de 4302 estudiantes.

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
07-08 a.m.	685	1056	781	801	439	15
08-09 a.m.	1870	1976	1600	1961	1195	15
09-10 a.m.	1682	1755	1554	1658	1024	9
10-11 a.m.	1778	1854	1636	1831	1276	11
11-12 a.m.	1778	1895	1646	1755	1252	9
12-01 p.m.	398	534	272	414	180	2
01-02 p.m.	136	183	93	138	113	2
02-03 p.m.	1524	1621	1655	1721	780	0
03-04 p.m.	1686	1646	1736	1817	876	0
04-05 p.m.	1661	1609	1427	1570	664	37
05-06 p.m.	1632	1444	1166	1435	460	37
06-07 p.m.	239	196	147	81	10	41

Tabla 3.2: Registro de ocupación estudiantil del edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes. Datos del Semestre A-2009 suministrados por OREFI

En vista de que los datos fueron suministrados con la ocupación estudiantil total, fue necesario realizar un muestreo para establecer la densidad de personas en cada recinto. Este proceso fue realizado en el Ala Oeste, ya que representa el sector escogido para desarrollar este proyecto. Fueron tomados en cuenta sólo los horarios más concurridos. El promedio de ocupantes para los días Martes y Jueves en los horarios que van de 8:00 a 9:00 a.m. y 10:00 a 11:00 a.m., observado durante cinco semanas, se muestra a continuación:

	Horario			
	Martes		Jueves	
Dependencias del Ala Oeste	08-09 a.m.	10-11 a.m.	08-09 a.m.	10-11 a.m.
3O-04	0	15	20	11
3O-03	25	34	15	15
3O-02	20	15	35	22
3O-01	0	0	20	11
3O-08	12	0	15	28
3O-07	12	12	30	0
3O-06	0	15	6	0
3O-05	0	0	12	0
3O-17	13	12	10	0
3O-16	22	12	15	0
Revista ciencia e ingeniería	1	1	1	1
3O-14	0	10	0	14
3O-13	13	14	0	0
Sistemología Interpretativa	0	0	0	0
3O-10	0	13	15	0
3O-09	20	0	0	29
CEIE	0	2	0	0
Total 3er Piso	138	155	194	131
2O-12	0	0	10	15
2O-11	25	0	6	0
2O-10	0	0	0	0
Lab. Sensores Remotos	0	2	0	2
Lab. Paleontología	0	4	0	1
Lab. Petrología	0	0	0	4
Lab. Mineralogía	0	0	0	0
Dirección de Geológica	1	0	1	0
Secretaría de Geológica	1	2	1	1

Cubículo 12	0	1	0	1
Cubículo 11	0	1	2	2
Cubículo 10	0	1	1	1
Cubículo 9	1	1	0	1
Cubículo 8	2	1	2	1
Cubículo 7	0	2	0	3
Cubículo 6	1	1	0	0
Cubículo 5	1	2	2	0
Cubículo 4	0	0	2	2
Cubículo 3	2	0	0	0
Cubículo 2	0	0	1	1
Cubículo 1	0	2	0	1
Biblioteca de Geológica	0	0	0	0
Seminario de Geológica	0	0	0	0
Interpretación del Subsuelo	2	1	0	1
Lab. Computación	0	3	0	5
Total 2do Piso	36	24	28	42
1O-06	30	0	0	24
1O-05	0	0	22	13
1O-04	30	0	22	45
1O-03	30	14	0	15
1O-02	30	10	9	36
1O-01	25	6	13	0
1O-07	0	10	9	5
1O-08	0	15	0	0
1O-09	0	20	0	20
1O-10	15	15	20	18
1O-11	20	11	35	0
1O-12	40	0	28	38
1O-13	30	30	15	0

10-14	0	15	25	35
Total 1er Piso	250	146	198	249
SO-04	25	0	19	16
SO-03	20	38	15	0
SO-02	25	0	35	35
SO-01	0	0	35	0
SO-05	0	0	48	16
SO-06	25	30	15	32
SO-07	0	30	34	0
SO-08	29	0	25	32
Mantenimiento	0	1	0	1
Cafetín	80	63	60	64
Cocina	5	5	5	5
Publicaciones	2	4	2	4
CE	2	1	1	1
Salón de lectura	15	12	12	31
Lab. Mecánica	0	1	1	0
SS-02	0	0	10	18
Total Sótano	228	185	317	255

Tabla 3.3: Promedio de ocupación del Ala Oeste

A través de los datos de la tabla 3.3, se puede observar que el Ala Oeste para el día Martes en horario comprendido entre las 8:00 y 9:00 a.m., alberga un 33% del total de personas. De igual forma, para el mismo día entre las 10:00 y 11:00 a.m., este sector es ocupado por un 28% de la población académica. El Jueves entre 8:00 y 9:00 a.m. se tiene un 38% del total y para las 10:00 a.m. el 37%.

3.1.2 Descripción de los ocupantes

La evacuación de personas en edificaciones de varios pisos en presencia de obstáculos denota un ambiente complejo, en donde la forma de desplazarse para abandonar la estructura representa un comportamiento reactivo, y la interacción con otros ocupantes y el mismo ambiente para satisfacer los objetivos, involucran la habilidad social.

Los ocupantes son agentes que tienen por meta salvar sus vidas. Este objetivo lo buscan siguiendo las rutas que le permitan desalojar el edificio. Generalmente, las personas se desplazan por las rutas que conocen y transitan con mayor frecuencia.

Tomando en cuenta que el ser humano expresa diferentes emociones ante cualquier situación de emergencia, fueron considerados dos tipos de agentes que simplifican en gran medida las conductas de las personas en estos casos. Dicha simplificación esta basada en un número importante de investigaciones, donde se concluye que los ocupantes de un edificio responden a un evento (sismos, incendios, entre otros) en función de las personas con quienes estén, de sus experiencias anteriores y del entrenamiento previo. En general, muy pocas personas sufren de pánico; en algunos casos de forma permanente y en otros durante períodos breves de tiempo. Por otro lado, quienes no padecen de pánico, al recibir indicaciones de desalojar el lugar, lo hacen racionalmente por unidades grupales.

Los tipos de ocupantes considerados en el modelo son: ocupantes informados y ocupantes desinformados.

- **Ocupante informado:** tiene pleno conocimiento del edificio. Busca alejarse del peligro abandonando el recinto; para ello sigue la ruta más común de salida. En caso de que la salida de dicha ruta no esté disponible, busca cualquier puerta cercana que lo conduzca al desalojo. Emplea una velocidad de movimiento constante que disminuye si la vía por la que transita tiene un número elevado de ocupantes.
- **Ocupante desinformado:** conoce el edificio de manera limitada. Siempre utiliza como salida la puerta más cercana y siguiendo cada aviso que indique una ruta de evacuación. En caso de obstrucción, busca otra puerta cercana que lo conduzca al desalojo.

Es importante señalar que el modelo desarrollado permite observar la aparición de ciertos fenómenos durante el tiempo de simulación, dependiendo de la ubicación y el flujo de personas. Por lo tanto, cualquier agente puede variar su comportamiento, en cuyo caso quedará inmóvil o seguirá con su regla de movimiento cambiando los parámetros de desplazamiento y velocidad. Si se da una situación en la cual un agente presenta una actitud completamente inmovilista e insensible al siniestro, puede ser considerado víctima de pánico. Este como consecuencia de la pasividad total puede llegar a padecer algún daño.

En cuanto a la determinación de los porcentajes de los diferentes tipos de ocupantes, fue tomado como punto de referencia la información suministrada por la Oficina de Registros Estudiantiles de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes (OREFI), sobre el promedio de estudiantes que ingresan a la Institución cada semestre. El número de ingresos es de aproximadamente 400 personas, lo cual representa más del 9% de la población estudiantil total.

Según esta proporción estudiantil y en base a las experiencias adquiridas en la Facultad de Ingeniería, se estableció que un 90% de los estudiantes estarán representados por los ocupantes informados, y el 10% restante referente a los alumnos de nuevo ingreso, serán representados por los ocupantes desinformados. El porcentaje mayoritario también abarca al personal que labora en el edificio.

Para esta clasificación, se establece que los ocupantes informados del segundo piso del Ala Oeste, se desplazarán a la salida grande que conduce a la Escuela de Sistemas (Ala Sur), ya que los comunica con la salida principal del edificio; los ocupantes desinformados utilizarán siempre la salida más cercana (salida grande o escaleras), ya que llevan poco tiempo en la Facultad y no conocen en su totalidad la forma más rápida de desalojarla. Lo mismo ocurrirá con los ocupantes del primer piso. Las personas que se encuentran en el sótano saldrán por su salida principal que tiene como punto de destino a uno de los estacionamientos. En el tercer piso el 100% de los ocupantes se moverán hacia las escaleras.

Los ocupantes no poseen dimensiones que representen la figura humana, sin embargo, las reglas de movimiento programadas para este proyecto permiten establecer a través de la densidad de ocupación en cada celda, la noción de volumen en los mismos.

3.1.3 Descripción de obstáculos

Los obstáculos hacen referencia a las barreras físicas que se interponen en una acción, en este caso, al libre tránsito por los espacios. Un obstáculo impide el avance hacia adelante. Para este estudio están representados por: pupitres, mesas, puertas cerradas, paredes y paredes caídas.

Una puerta cerrada, representa un obstáculo que retrasa el desalojo y obliga a los ocupantes a buscar otra puerta de salida.

Las paredes que dividen el espacio impiden el desplazamiento libre, por lo cual deben ser esquivadas durante el movimiento.

Una pared caída puede resultar en una nueva puerta de salida, pero según su ubicación, puede alterar el movimiento o hacer que el espacio adyacente sea inaccesible.

Los pupitres son modelados con medidas iguales a 50 cm de ancho y 75 cm de largo. Los escritorios, por su parte, miden 125 cm de ancho y 50 cm de largo. Es importante aclarar que este tipo de obstáculos es modelado sólo en algunos espacios en vista de la elevada cantidad. En todo caso a partir de las reglas de movimiento, los pupitres y mesas son simulados a través de la densidad de ocupación en cada una de las celdas de los espacios que los contienen.

3.1.4 Descripción del ambiente

Los agentes son diseñados basados en las características del ambiente y el control que puedan tener sobre éste. Las características principales del ambiente que rige el desarrollo de este sistema son:

- **Parcialmente observable.** Cada ocupante no puede ver o percibir el edificio en su totalidad, sólo tiene un rango de visión.
- **Determinístico.** Una misma acción realizada dos veces ante circunstancias iguales tendrá efectos similares. La presencia de obstáculos puede provocar diferentes estados, siempre que haya algún cambio en el estado inicial de las variables para cada escenario que se simule, de lo contrario el comportamiento será igual.

- **Espacio modificable.** El edificio debido al tipo de catástrofe a modelar (sismos), puede sufrir cambios sin que el ocupante realice una acción para ello.
- **Tiempo continuo con avance discreto.** Los agentes varían y cambian su estado en instantes de tiempo, pero el tiempo total de la simulación es continuo y se incrementa en base a los instantes discretos en los que cambian los parámetros iniciales del sistema. Por otra parte, todos los ocupantes pueden desenvolverse al mismo tiempo estando sujetos a cualquier cambio durante el desarrollo de la simulación sin que ésta realice una pausa o pare en forma definitiva.

3.2 Simulación multiagente

En este sistema los ocupantes son modelados como agentes móviles y reactivos. Cada uno toma la decisión de moverse a cierta velocidad de acuerdo a la regla de movimiento que rige su tipo y según la cantidad de personas que se encuentran en el espacio donde se esta desplazando. Los diferentes elementos que conforman la edificación como pupitres, mesas, puertas, escaleras, pasillos y paredes son modelados como objetos estáticos, así que no presentan cambios en tiempo de ejecución de la simulación. Para realizar un cambio en la configuración inicial de estos objetos, primero se genera el evento y luego se lleva a cabo la corrida del sistema.

3.2.1 Comportamiento de los agentes dentro del sistema

Los ocupantes que se encuentran en un espacio se desplazan a su nueva posición en función de una regla de movimiento basada en el estado actual del ocupante y en el estado que presenta la celda en la que se encuentra. En gSpaces un espacio es modelado mediante un *Space*, dentro del cual hay un nodo *Move* encargado de actualizar las posiciones de los individuos en cada intervalo de tiempo de acuerdo a la ley de movimiento y al tipo de agente. También posee el nodo *Mobiles* que actúa como contenedor de los agentes, es decir, retiene a los móviles que se encuentran en el espacio y serán enviados a las salidas. Dichas salidas son modeladas con el nodo *Door* que se encarga de enviar a los agentes a nuevos espacios, o al nodo *Exit* si cruzan una salida

general del sistema. De igual forma, para la comunicación entre espacios separados como es el caso del paso de un piso a otro, fue desarrollado en este proyecto el nodo *MiDoor* que hereda atributos de *Door* y permite enviar a los individuos que terminan de recorrer una escalera al siguiente nivel, logrando la abstracción de circulación vertical en un espacio horizontal (ver sección 3.2.5). Los límites del espacio están representados por paredes, las cuales son modeladas en la construcción del *Space* mediante el nodo *Wall*.

En este estudio se desarrolla un modelo que representa la dinámica peatonal de la evacuación de un edificio. El edificio fue descrito en la sección 3.1.1, y el comportamiento de los ocupantes que se desenvuelven en él, está reflejado en la definición de cada una de sus formas de clasificación. Influenciado por la ubicación, los límites, las puertas y la regla de movimiento, el agente se desplazará por los espacios que forman la estructura.

Si se trata de un agente informado, avanzará con una rapidez de una unidad de distancia por unidad de tiempo de simulación, pudiendo cambiar de dirección para alcanzar la puerta de salida que lo conduce al desalojo en el menor lapso posible. Un agente desinformado simplemente llevará a cabo acciones similares, pero dirigiéndose no precisamente a las salidas más comunes sino a las más cercanas a su posición. Por ejemplo: si un ocupante informado sale del salón 2O-12 al pasillo del segundo piso, su destino será la puerta de dicho pasillo que conduce a la salida general del edificio, mientras que un ocupante desinformado se desplazará hacia alguna de las escaleras, por ser éstas las salidas de mayor cercanía para abandonar el piso.

Si el agente se encuentra en una celda, cuya ocupación es mayor o igual a dos agentes, su velocidad disminuirá. Si se trata de una escalera, la velocidad será menor y también estará condicionada a reducirse de acuerdo a la densidad de ocupación que presente el espacio. Sumado a esto, el ocupante tiene la posibilidad de cambiar de posición, no precisamente hacia adelante, sino hacia un lado de la trayectoria que conduce a la salida para desplazarse por zonas cuya densidad de ocupación sea menor y de esta manera evitar una reducción significativa de su velocidad.

3.2.2 Campos que definen el comportamiento de los agentes y su entorno

Los agentes móviles y reactivos desarrollados mediante gSpaces poseen un sistema interno de variables heredado de GALATEA. Dichas variables pueden ser manipuladas para cumplir con los requerimientos del sistema en desarrollo, indicándose directamente en el código que contiene implementado el SMA.

Para el presente modelo se estableció que la resolución espacial, es decir, el tamaño de cada lado de las celdas que forman todos los espacios es igual a 1,0 metros. Igualmente se asigna un paso de simulación de 0,1 segundos para actualizar el estado del sistema hasta alcanzar un tiempo máximo de simulación de 500 segundos que se justifica en la sección 3.2.6 de este capítulo.

Los agentes son definidos como ocupantes informados o desinformados, teniendo los primeros un porcentaje mayor. Entre los campos que definen su sistema de variables internas se encuentran: velocidad, tipo de agente, número de agentes, visibilidad, ubicación, color y dirección.

Los valores de los parámetros que definen el desplazamiento de los agentes y la creación de su entorno son:

Parámetro	Display
Nombre	Display
Intervalo para refrescar animación	0,1 s
Parámetro	Node
Nombre	Exit
Tipo de nodo	E , Salida del sistema
Parámetro	MobileAg
Nombre	mobileAg
Velocidad	2,0 m/s
Número inicial de agentes	772
Proporción de tipos de agentes	Arreglo de porcentajes = {0,9 ; 0,1}

Tabla 3.4: Valores de los parámetros de los nodos Display, Exit y MobileAg

Parámetro	Space 3O-16 (3er Piso)
Nombre	3O-16
Número inicial de ocupantes	15
Coordenada X del punto interno	10,5
Coordenada Y del punto interno	6,5
Resolución de la celda	1
Paso de Simulación	0,1
Regla de movimiento	Diferentes
Parámetro	Space 2O-11 (2do Piso)
Nombre	2O-11
Número inicial de ocupantes	6
Coordenada X del punto interno	84,0
Coordenada Y del punto interno	12,0
Resolución de la celda	1
Paso de Simulación	0,1
Regla de movimiento	Diferentes
Parámetro	Space pasillo1 (1er Piso)
Nombre	pasillo1
Número inicial de ocupantes	6
Coordenada X del punto interno	30,9
Coordenada Y del punto interno	69,0
Resolución de la celda	1
Paso de Simulación	0,1
Regla de movimiento	PrefPuno
Parámetro	Space pasilloS (Sotano)
Nombre	pasilloS
Número inicial de ocupantes	8
Coordenada X del punto interno	90,0
Coordenada Y del punto interno	72,0
Resolución de la celda	1

Paso de Simulación	0,1
Regla de movimiento	PrefSotano

Tabla 3.5: Constructores de algunos espacios del Ala Oeste del edificio de la Facultad de Ingeniería

El modelo esta formado por 23 espacios en el tercer piso, 31 en el segundo piso, 18 en el primer piso, 28 en el sótano, 17 escaleras y 3 entrepisos, para un total de 120 espacios. Todas estas dependencias están formadas por un conjunto de objetos estáticos, representados por puertas y paredes, definidos por coordenadas iniciales y finales.

3.2.3 Cambios en la configuración inicial de los espacios

El desalojo de un edificio generalmente tiene por causa la aparición de un evento con características de riesgo para sus ocupantes. Estos eventos pueden ser inundaciones, terremotos, incendios, entre otros. Por ejemplo, la aparición de un sismo puede producir cambios en las características que definen un espacio, como la caída de paredes, obstrucción de vías de circulación, entradas y salidas, en fin, daños importantes que obligan a buscar resguardo y abandonar las zonas que no brindan seguridad.

En gSpaces es posible simular los cambios que puede sufrir un espacio a raíz de un evento sísmico, así como los efectos que producen esos cambios sobre la dinámica de los agentes. Para este estudio se desarrollaron algunos métodos que pueden ser ejecutados para modificar los espacios pertenecientes al modelo y luego llevar a cabo el proceso de simulación.

A través de las funciones desarrolladas, se simularon los daños que pudieran ocurrir en el Ala Oeste de la Facultad de Ingeniería, que básicamente se resumen en: caída de paredes y obstrucción de vías de escape. La referencia para simular estos daños fue tomada de la orientación del Ingeniero Civil Pedro Rivero y del estudio de una de sus investigaciones titulada “Vulnerabilidad Sísmica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes” (Guia, 2005).

Los métodos empleados para cambiar la configuración inicial de la estructura son:

- **Caída de paredes:** recibe como parámetros un arreglo de paredes de dimensiones superiores a los seis metros, un porcentaje de caída y el tiempo de ejecución. A la pared, según su longitud, se le asigna una probabilidad acumulada que viene dada por su magnitud entre la sumatoria de las medidas de paredes similares. Esta a su vez, es afectada por el porcentaje de caída especificado en uno de los parámetros de la función. Posteriormente se genera un número aleatorio empleando una distribución uniforme entre 0 y 1. Si este número es menor o igual a la probabilidad total calculada, la pared cae y genera un cambio en la estructura. Dependiendo de su ubicación, podrá convertirse en una nueva vía de escape (con ciertas limitaciones de desplazamiento para los ocupantes) o por el contrario hará más difícil el desalojo. Luego de ejecutada la función y teniendo identificado los cambios ocurridos, se procederá a correr la simulación para llevar a cabo el proceso de evacuación. En esta función se implementan fuertes criterios de decisión debido a lo difícil que resulta predecir algún daño importante en el sector del edificio modelado.
- **Cerrar puertas:** recibe como parámetros un arreglo de puertas y cambia sus condiciones iniciales de estar abiertas para pasar a estar cerradas.
- **Abrir puertas:** recibe como parámetros un arreglo de puertas que inicialmente están cerradas y cambia su estado al de puertas abiertas.
- **Cerrar puerta:** cierra una puerta.
- **Abrir puerta:** abre una puerta.

3.2.4 Implementación de las reglas de movimiento

La librería gSpaces de GALATEA esta formada por clases y métodos codificados en su totalidad a través de *java*. De tal forma que el modelo y los nuevos procedimientos desarrollados en este proyecto, están escritos en este lenguaje de programación.

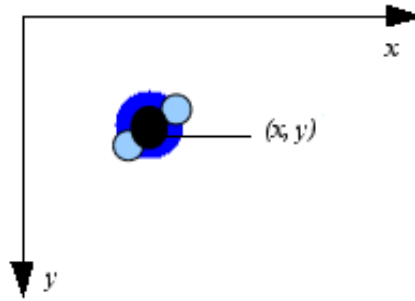


Figura 3.3: Representación del agente

La representación del ambiente de evacuación con agentes móviles y reactivos, esta dada por la ubicación de cada uno de los ocupantes, la ubicación de puertas, los obstáculos y los límites de cada espacio. La figura 3.3 muestra la representación del agente y la figura 3.4 ilustra el ambiente de evacuación.

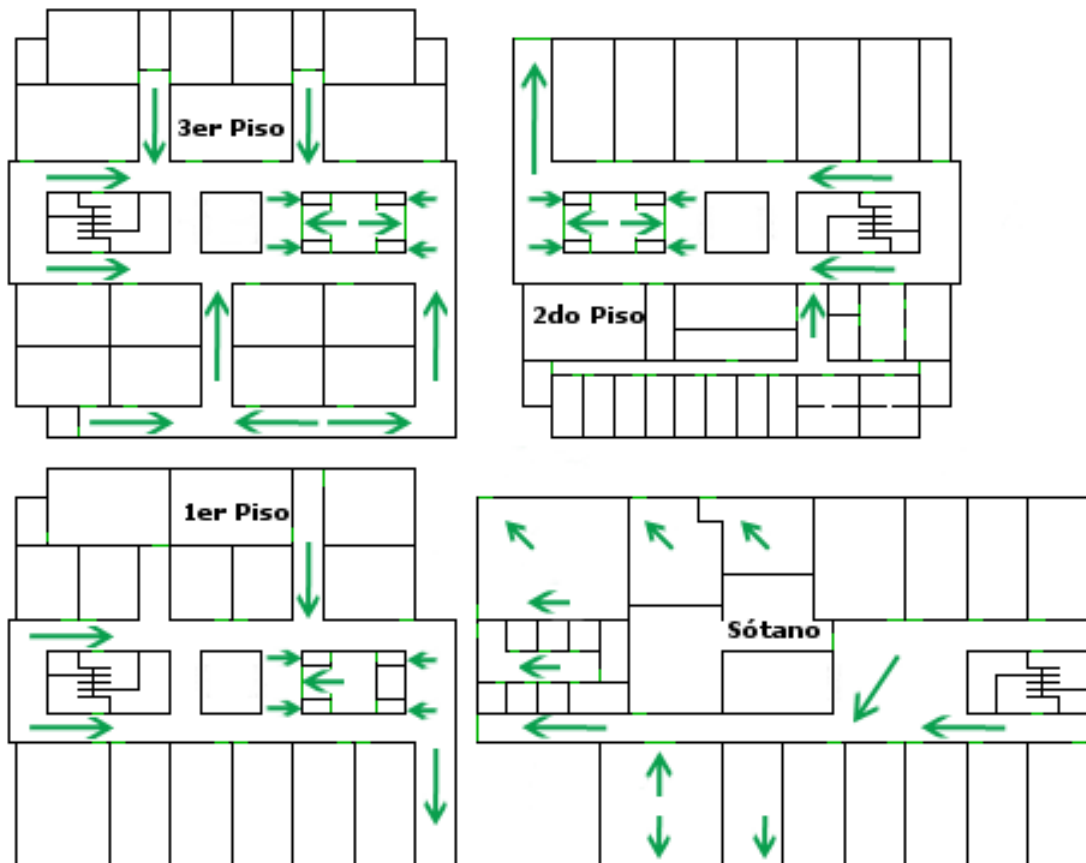


Figura 3.4: Representación del ambiente de evacuación

Tomando en cuenta la distribución del ambiente y la definición de los tipos de agentes, se desarrollaron reglas de movimiento que permiten recorrer cada espacio según sus características y de acuerdo al objetivo general que es desalojar el edificio. Estas reglas fueron desarrolladas tomando como base la regla de movimiento que gSpaces tiene programada por defecto. Las mismas se explican a continuación:

- **Diferentes.** El algoritmo del método recibe como parámetros, el espacio, el agente y la celda ocupada. Se calcula la distancia que hay del centro de la celda hacia cada una de las salidas. Estas distancias son ordenadas de menor a mayor y el agente es enviado por la recta que define la distancia más corta, la cual conduce a la puerta más cercana. En caso de que la puerta este cerrada, se comprueba el estado de la siguiente puerta; si esta abierta el movimiento es dirigido hacia ella. En caso de que ninguna de las puertas de salida del espacio este abierta, el agente permanece adentro quedando obstruido. La forma en la cual el agente avanza hacia su destino representado por las coordenadas que identifican a la puerta, es haciendo uso de las formulas del movimiento rectilíneo uniforme, en donde se determina la distancia de recorrido a través de la velocidad y el paso de simulación establecido en el modelo. Se descompone la velocidad en x e y determinando la diferencia entre los puntos finales e iniciales para el recorrido en cada eje. Seguidamente, a cada diferencia se le suma la velocidad de la respectiva coordenada por el paso de simulación, con lo cual se determina la posición del agente en función del tiempo. Por otra parte, en esta clase se especifica la forma en la cual puede disminuir la velocidad.

Para los salones la variación de la velocidad esta determinada por la siguiente fórmula:

$$V = V_{max} \frac{1}{nAg + 2} \quad (3.1)$$

Donde:

V_{max} = velocidad máxima establecida en el modelo

nAg = número de agentes que se encuentran en la celda

La fracción $\frac{1}{n_{Ag}+2}$ indica la proporción de disminución de movimiento en la celda que al ser multiplicada por V_{max} , permite asignar la nueva velocidad a la cual se reducirá el agente. Se tiene como constante al número 2 para simular la ocupación aproximada de pupitres por celda, ya que en el sistema no son implementados en su totalidad. Sin embargo, se establece que la velocidad mínima de circulación debe ser mayor o igual a 0,2 metros por segundo. La figura 3.5 muestra la secuencia de movimiento en un salón que invoca esta regla.

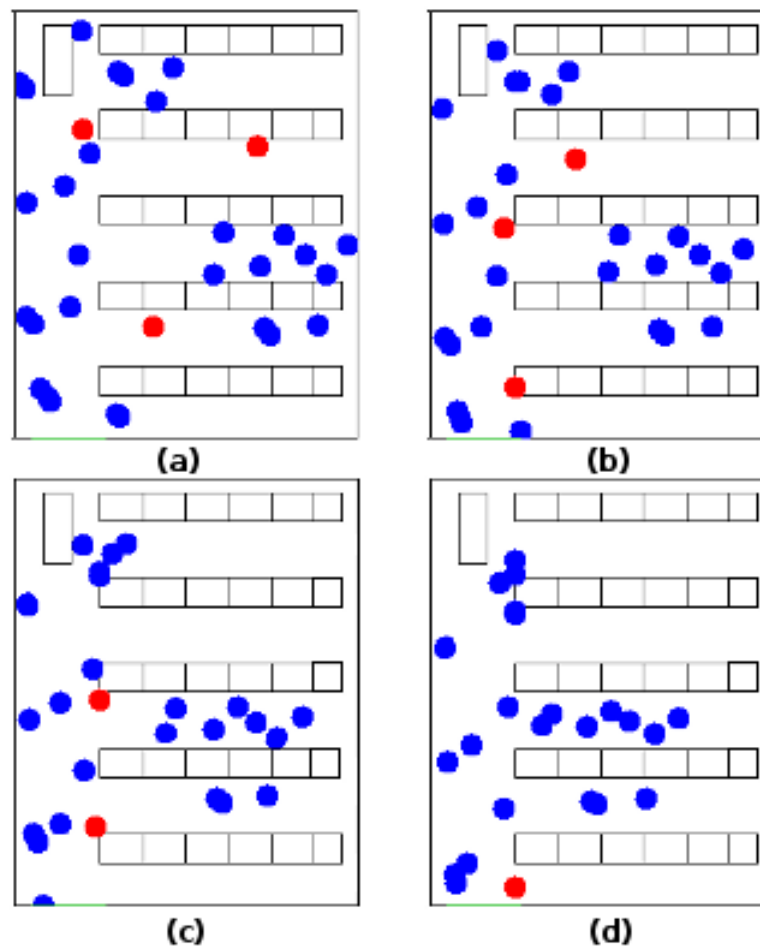


Figura 3.5: Secuencia de movimiento en un salón mediante la regla “Diferentes”

Para las escaleras son empleados los datos del estudio de circulación realizado por Fruins (1993). Dependiendo de la densidad de ocupación y del área de la escalera, las velocidades utilizadas son:

Libre sin restricciones:

$$Densidad = 0.54 \frac{Pers}{m^2} \quad V = 0.6 \frac{m}{s}$$

Parcialmente restringido:

$$Densidad = 1.07 \frac{Pers}{m^2} \quad V = 0.56 \frac{m}{s}$$

Restringido:

$$Densidad = 1.52 \frac{Pers}{m^2} \quad V = 0.51 \frac{m}{s}$$

Circulación densa:

$$Densidad = 2.7 \frac{Pers}{m^2} \quad V = 0.41 \frac{m}{s}$$

- **PrefPuno.** El algoritmo del método recibe como parámetros, el espacio, el agente y la celda ocupada. Se calcula la distancia que hay del centro de la celda hacia cada una de las salidas del espacio de forma similar a la regla anterior. Los ocupantes informados son dirigidos a las puertas grandes que conducen a la salida general del edificio, es decir, a la salida del sistema. Por su parte los ocupantes desinformados utilizan siempre la puerta más cercana; por lo general siguen la ruta de evacuación que está establecida a través de las escaleras. Para este tipo de movimiento, la variación de la velocidad está determinada por la siguiente fórmula:

$$V = V_{max} \frac{1}{nAg} \quad (3.2)$$

Donde:

V_{max} = velocidad máxima establecida en el modelo

nAg = número de agentes que se encuentran en la celda

La fracción $\frac{1}{nAg}$ indica la proporción de disminución de movimiento en la celda, la cual al ser multiplicada por V_{max} , asigna la nueva velocidad a la que se reducirá el agente. Se establece que la velocidad mínima de circulación debe ser mayor o igual a 0,2 metros por segundo.

Sin embargo, a pesar de indicar parámetros de velocidad para ser reducida en caso de que la celda este ocupada por varios agentes, esta regla de movimiento, incluye la noción de volumen de las personas. Si una celda es ocupada por 5 agentes, se indica el movimiento de uno de ellos hacia un lado (siempre que siga estando dentro del espacio), sin prohibirle que continúe hacia su punto de destino. De esta manera las velocidades no presentan muchos cambios de reducción y el desalojo se desarrolla de una forma más rápida. Otra particularidad de esta regla, se refiere a la asignación de puntos de referencia hacia los cuales se dirigirán los ocupantes antes de llegar a una puerta. Con dichos puntos de referencia se busca que el movimiento tenga una mejor evasión de obstáculos, logrando así mayor cercanía a la forma en que se desplazan las personas en la realidad. La figura 3.6 ilustra la manera en que los ocupantes pueden transitar uno al lado del otro.

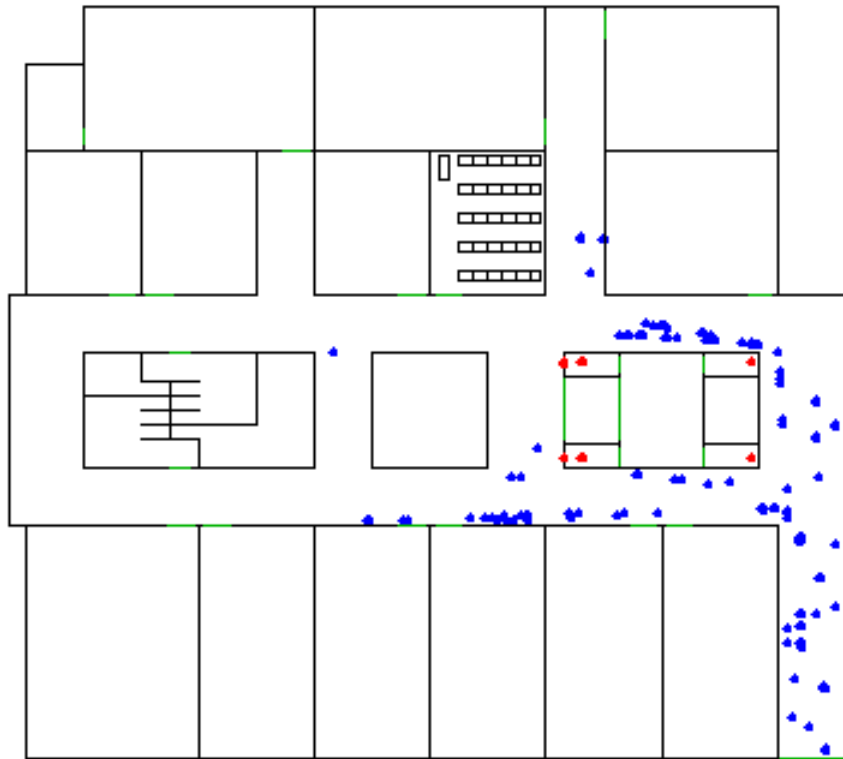


Figura 3.6: Desplazamiento de ocupantes que emplean la regla “PrefPuno”

- **PrefPdos.** Este método es similar a PrefPuno, pero se aplica a los ocupantes que se encuentran en el pasillo del segundo piso.

- **PrefPtres.** Este método es similar a PrefPuno y PrefPdos, y se aplica a los ocupantes que se desplazan por el pasillo del tercer piso. La figura 3.7 señala los puntos de referencia para realizar el movimiento.

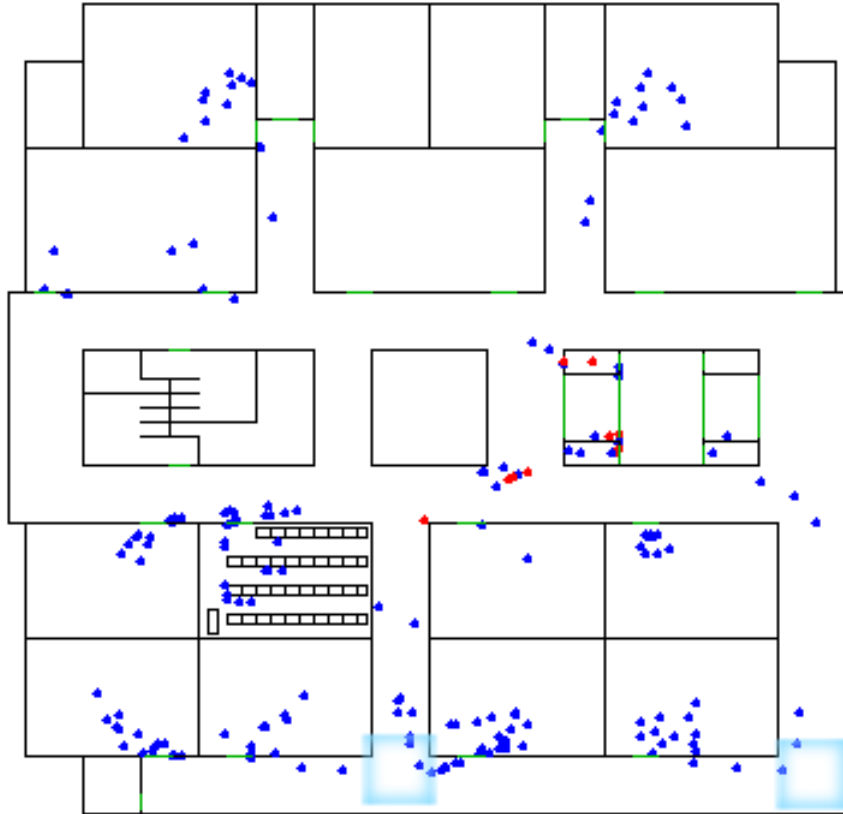


Figura 3.7: Puntos de referencia para el movimiento en regla “PrefPtres”

- **PrefPSotano.** El algoritmo de esta regla de movimiento tiene la particularidad de dirigir a los ocupantes hacia una puerta específica dado que el sótano sólo posee una salida. En caso de que dicha salida se encuentre bloqueada, las personas suben al primer piso. Sin embargo, para este escenario también seguirá siendo una sola la salida, por lo cual ambos tipos de ocupantes se comportan de forma similar. En la figura 3.8 se puede observar el rango de referencia especificado para que los agentes no se muevan bordeando las paredes y posteriormente continúen hacia su destino final.

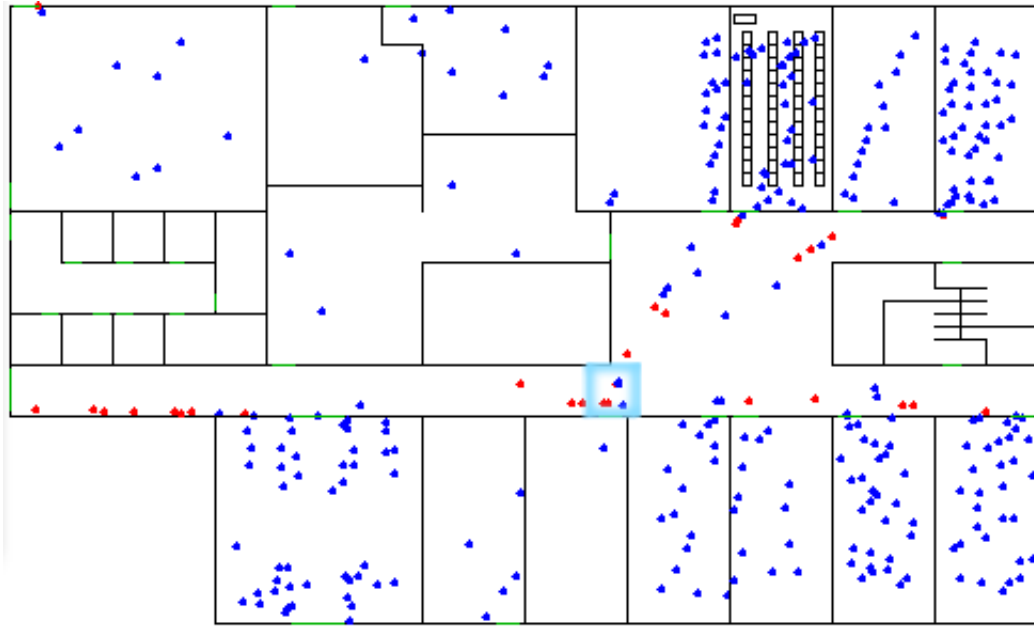


Figura 3.8: Puntos de referencia para el movimiento en regla “PrefPSotano”

- **PrefBder.** Esta regla tiene las condiciones de movimiento que deben seguir los ocupantes para desplazarse por los baños construidos a la derecha de la estructura modelada, representada por el segundo piso y el sótano. Se emplean puntos de referencia para mejorar el movimiento.
- **PrefBizq.** En esta regla se especifican las condiciones de movimiento para que los ocupantes se desplacen por los baños construidos a la izquierda de la estructura modelada, representada por el tercer y primer piso. Se emplean puntos de referencia para mejorar el movimiento.

3.2.5 Implementación de puertas para conexión entre pisos

El presente modelo establece la evacuación de personas en un edificio de varios pisos. En gSpaces no se contempla el modelado y la simulación de espacios en 3D. Por lo tanto, no tiene definidas sentencias en las cuales puedan conectarse los distintos niveles de una edificación. Precisamente es a través de las puertas, que este proyecto maneja la definición de varios pisos, manteniendo intactas las condiciones de desarrollo en 2D que posee la librería. En este modelo cada piso es colocado uno al lado del otro y

las escaleras son simuladas de igual forma que los demás espacios, pero con ciertas características que las hacen diferentes. Cada escalera que cuenta con una puerta de salida hacia a otro piso, necesita tener una conexión. La forma en la cual se establece la comunicación vertical en espacios modelados horizontalmente, es a través de la creación de una puerta que hereda atributos de la clase *Door* de gSpaces. Para ello se creó una clase llamada *MiDoor* que se extiende de *Door* y se encarga de definir los atributos necesarios para que un agente sea enviado a un espacio que no esta conectado a la puerta de salida.

Una puerta *MiDoor* recibe como parámetros: el nombre, la capacidad, un retardo, las coordenadas iniciales y finales en x e y que definen su segmento, el espacio que la contiene, el espacio hacia el cual será enviado el agente y las coordenadas en las cuales debe ser ubicado luego de cruzarla. Si se trata de un espacio donde la nueva ubicación sólo tiene variación en el eje x , se especifica la nueva coordenada en x ; si la nueva ubicación sólo tiene variación en y , se especifica la nueva coordenada en y . Si la nueva ubicación varía tanto en x como en y , se deben especificar las nuevas coordenadas para ambos ejes.

Una vez que han sido asignados los valores de los parámetros de la función, el método *sendto* de la clase, asigna al campo de velocidad del agente, la velocidad que llevaba en el espacio anterior; al campo de la coordenada x le asigna la coordenada x establecida en la función y para y lo hace de la misma manera. Luego de esto el agente sigue, según su tipo, la regla de movimiento que le indica el nuevo espacio al que pertenece. Las figuras 3.9 y 3.10 ilustran el funcionamiento de esta clase. En ellas también se puede apreciar que los niveles del edificio son colocados uno al lado del otro, pero se disponen de tal manera que las escaleras puedan estar cerca.

3.2.6 Asignación del tiempo de simulación

El tiempo máximo considerado para la simulación esta determinado por la longitud de los recorridos, la velocidad de circulación y los tiempos de desalojo obtenidos para cada velocidad. Como se mencionó anteriormente, este proyecto considera el modelo de locomoción desarrollado por Fruins (1993), con algunas variantes que se ajustan a mediciones realizadas en el Ala Oeste de la Facultad de Ingeniería.

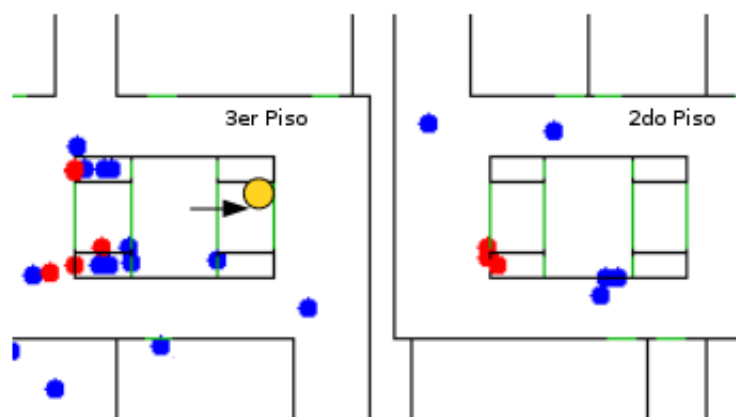


Figura 3.9: Agente color amarillo que recorre el final de una escalera para pasar al 2do Piso

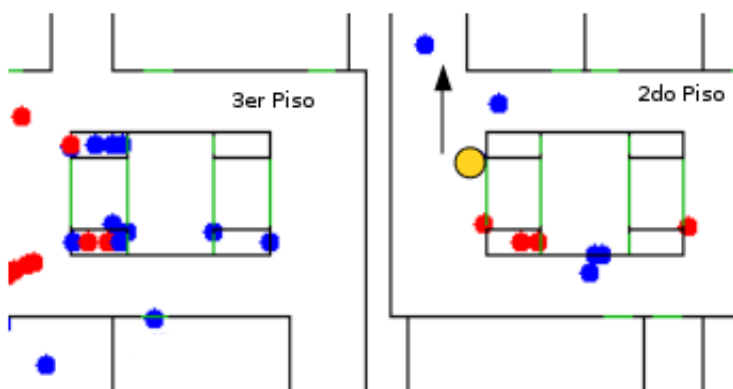


Figura 3.10: Agente color amarillo que al cruzar la puerta de salida de la escalera es enviado al 2do Piso. Luego continúa su recorrido hacia la salida del espacio.

Las velocidades se obtuvieron para un recorrido que va desde el tercer piso del Ala Oeste hasta la salida del pasillo del sótano. En la tabla 3.6 se muestran los valores obtenidos:

Recorrido (metros)	Movimiento	Tiempo (segundos)	Velocidad (m/s)
92,3	Lento	154,0	0,6
92,3	Normal	77,0	1,2
92,3	Rápido	46,4	2,0

Tabla 3.6: Valores de tiempo y velocidad para una longitud de recorrido ante diferentes tipos de movimiento

La segunda velocidad de la tabla coincide con el valor presentado por Fruins (1993) para un recorrido normal sin restricciones en circulación horizontal.

Para determinar el tiempo de simulación se emplearon los valores de la tabla 3.6. El mismo se expresa por medio de la siguiente formula:

$$Tsim = Max_{j=1,2,3} T_j + t_h \quad (3.3)$$

Donde:

$j = \text{estrategia de movimiento}$

$T_j = \text{tiempo total de recorrido para } j$

$t_h = \text{tiempo de holgura}$

De esta manera el tiempo de simulación viene dado por:

$$Tsim = Max \{154,0 \text{ s}; 77,0 \text{ s}; 46,4 \text{ s}\} + 350 \text{ s} = 504 \text{ s} \quad (3.4)$$

Se asignó un tiempo de holgura de 350 segundos debido a que la velocidad mínima de movimiento establecida en el modelo es de 0,2 metros por segundo, con lo cual se llevaría a cabo el recorrido en 462 segundos.

3.2.7 Interacción entre los ocupantes

La interacción se da a través de la percepción del ambiente, representado en cada uno de los espacios del Ala Oeste de la Facultad. Los ocupantes interactúan basados en la información que provee el entorno, como por ejemplo, la densidad de ocupación de las celdas, la capacidad de una puerta para recibir agentes, las trayectorias que definen el recorrido y las reglas de movimiento que rigen la forma de llegar a la salida general del sistema. En la realidad una persona es influenciada por sus propias percepciones, por sus emociones y sentimientos, pero también es afectada por la forma de actuar de las demás personas. Dentro del mundo de los agentes la comunicación visual puede ser simulada haciendo que los valores de ciertos parámetros como la posición y la velocidad que antecede a otros, puedan ser observados. Esto es posible en el presente modelo, por medio de la información que poseen las celdas del espacio, la cual es accesible a cada agente u ocupante que emplee las reglas de movimiento explicadas anteriormente.

3.2.8 Representación gráfica del modelo

La librería gSpaces tiene incluida una clase llamada *Animation* encargada de animar la simulación del desalojo realizada por un modelo, permitiendo observar claramente el movimiento de los agentes móviles y reactivos que forman el sistema, así como el conjunto de límites y objetos que definen el entorno. En esta clase es posible modificar valores de algunos parámetros de su código como por ejemplo: ancho y altura de la ventana que muestra la simulación y tiempo de retraso para refrescar la animación. De igual forma es posible cambiar el color de cada tipo de agente y de los diferentes elementos que forman el ambiente. Los datos que va arrojando la traza en cada paso de la simulación son mostrados a modo de texto en consola. Si se utiliza *NetBeans* (ambiente de desarrollo integrado para *java*) muestra un botón para iniciar la simulación y otro para detenerla.

3.3 Simulación del modelo

El modelo esta formado por un conjunto de espacios pertenecientes al Ala Oeste de la Facultad de Ingeniería. Este sector fue seleccionado por ser el sector que permanece a diario con una mayor densidad de ocupación. Tal como ha sido explicado a lo largo de este capítulo, el sistema permite que se puedan realizar movimientos en todos los sentidos, cambiar la ubicación dentro de los espacios y entre ellos, aumentar o disminuir velocidades estableciendo límites máximos y mínimos, además de incluir comportamientos generales en los ocupantes, diferenciándose dos tipos: informados y desinformados. La representación gráfica del modelo se puede observar en la figura 3.11.

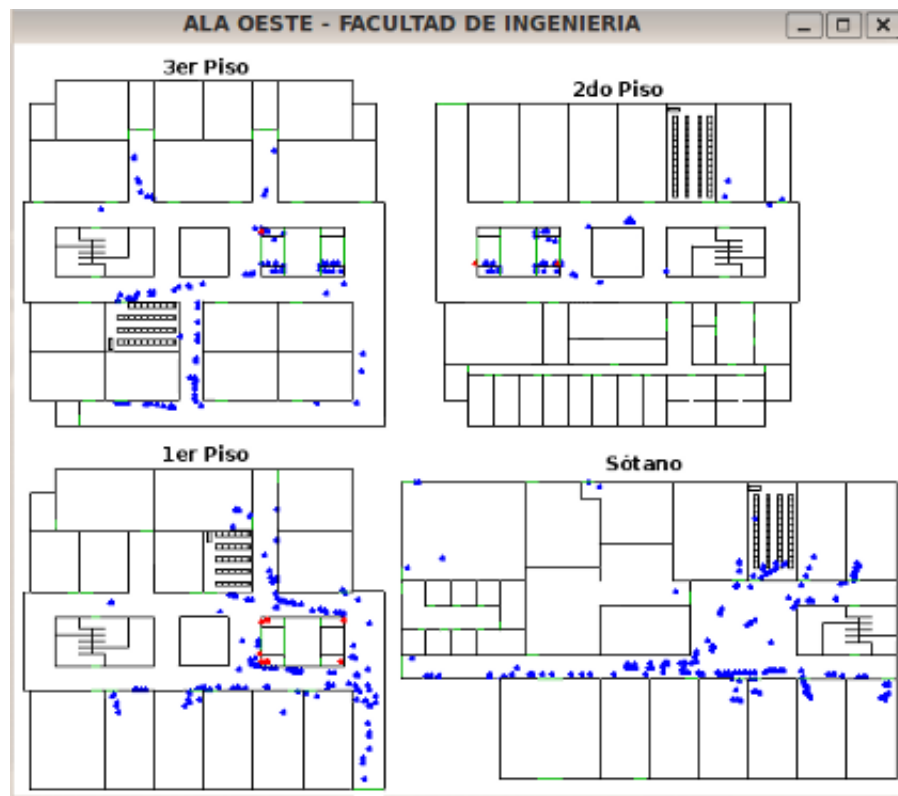


Figura 3.11: Representación gráfica del modelo

Fueron creados más de trece métodos que controlan el movimiento de los diferentes tipos de agentes y permiten cambiar la configuración inicial del ambiente de manera aleatoria. También se generan datos estadísticos sobre la cantidad de ocupantes que

cruzan una puerta y que desalojan el Ala Oeste, la población de los espacios por cada paso de simulación, tiempo de salida del sistema y secuencia de espacios transitados.

La estructura del modelo implementado a través de *java*, importa todas las características del motor de simulación de GALATEA, de su librería gSpaces y de los procedimientos desarrollados en este proyecto. El modelo puede ser manipulado por medio de su código para cambiar los valores de los parámetros del sistema y programar distintos escenarios. Estos parámetros son: velocidad promedio, resolución espacial, distribución del espacio, cantidad de ocupantes, paso y tiempo de simulación, invocación de reglas de movimiento, definición de puertas y paredes, y creación de cada tipo de ocupante.

Una vez que han sido especificados los valores de los parámetros, el modelo procede inicializando todas sus variables por medio de la compilación del sistema. Luego se corre la simulación, con lo cual se hace el llamado a todas las funciones que clasifican, construyen y mueven a los ocupantes. Los ocupantes iniciales son distribuidos de manera uniforme entre las coordenadas iniciales y finales que definen los límites del espacio en el cual se construyen. Inmediatamente, el programa asigna a los ocupantes de acuerdo a las variables del sistema, las acciones a realizar influenciadas principalmente por la forma de movimiento y un punto de destino. El ocupante podrá moverse una vez que la regla calcule la velocidad a la cual se puede desplazar y determine la posibilidad de cambiar de celda según la densidad de ocupación (ver sección 3.2.4).

3.4 Verificación y validación del modelo

La verificación y validación en todo proceso de simulación, representa una de las tareas más importantes a realizar por parte de los desarrolladores del modelo. La verificación se centra en determinar la consistencia del sistema simulado, es decir, asegurarse que el modelo cumple las funciones para las cuales ha sido desarrollado y por lo tanto determinar si se ha construido correctamente. En términos generales, la verificación permite comprobar que la implementación del modelo de simulación se corresponde con la estructura del mismo, arrojando resultados coherentes para cada prueba realizada.

Existen diversas formas de verificación, tales como: comprobación de códigos para

determinar si se han introducido correctamente los datos, revisión de los mismos por parte de terceras personas que tengan conocimiento del lenguaje de programación utilizado y de las especificaciones del sistema, explicar el modelo implementado a expertos para conseguir opiniones sobre su funcionamiento, observar la secuencia de acciones llevadas a cabo en intervalos de tiempo, cambiar condiciones iniciales, predecir qué evento puede ocurrir y luego ejecutar la simulación para comparar los resultados con la predicción, entre otros.

Por su parte, la validación esta relacionada con la correspondencia entre el modelo y la realidad. Tiene como objetivo fundamental producir un modelo lo suficientemente próximo que represente el comportamiento de un fenómeno, de tal manera que el sistema real pueda ser sustituido para experimentar determinados aspectos del mismo. A este objetivo se suma el hecho de poder aumentar a un nivel aceptable la credibilidad del modelo para que sea considerado al momento de tomar decisiones.

3.4.1 Verificación

Para verificar el modelo implementado en este proyecto, se tomó en cuenta el cambio de algunas condiciones iniciales, basadas en el aumento de la cantidad de los diferentes tipos de ocupantes. Según este procedimiento se deberían producir resultados que denoten valores diferentes de cruce para cada puerta de salida de los pasillos del edificio.

En la prueba se escoge libremente un número total de personas, para las cuales un 90% esta representado por ocupantes informados, mientras que un 10% se ve reflejado en los ocupantes desinformados. Luego se duplican las cantidades para observar los efectos en las salidas de la simulación. El número de ocurrencias de ocupantes en las puertas debe ser mayor para la segunda ejecución. La tabla 3.7 muestra los parámetros establecidos para la prueba.

Parámetros	1era ejecución	2da ejecución
Número de ocupantes	236	472
Número de ocupantes informados	212	424
Número de ocupantes desinformados	24	48

Tabla 3.7: Cantidad de ocupantes por ejecución

Salidas	1era prueba	2da prueba
Número de ocupantes que salen por el sótano	64	130
Número de ocupantes que salen por el 2do piso	76	152
Número de ocupantes que salen por el 1er piso	57	114
Número de ocupantes que salen por otros espacios	12	24

Tabla 3.8: Salidas del sistema

Efectivamente se observa a través de la tabla 3.8, que el número de ocupantes que cruzan las puertas de salida general del sistema aumentó y en igual proporción a como se aumentaron las cantidades de ocupantes en un 100%. Sólo en el primer renglón se aprecia un número mayor al doble, indicando que en la segunda prueba lograron salir más ocupantes de los que se esperaba. Se considera que estos valores son correctos y permiten demostrar que el modelo ha sido verificado.

3.4.2 Validación

Para llevar a cabo el proceso de validación, se procedió a comparar los tiempos de salida arrojados por el simulador para dos salones del Ala Oeste elegidos al azar, con los tiempos de salida obtenidos en una medición realizada en los mismos espacios.

El estudio fue realizado por dos observadores en cinco oportunidades. Cada observación corresponde a un día Jueves luego de las 9:00 a.m. y esta ligada a la operación de muestreo con la que se obtuvo el registro de ocupación de las dependencias del Ala Oeste del edificio de la Facultad de Ingeniería. La siguiente tabla muestra los datos obtenidos:

Salón	1O-05	SO-08
Número de ocupantes	22	25
Tiempo de último ocupante en salir (s)	59,1	61,0

Tabla 3.9: Tiempos de salida para dos salones del Ala Oeste

La cantidad de ocupantes y los tiempos expresados en la tabla 3.9 reflejan el promedio de las cinco observaciones para cada salón. En cada espacio se utilizó su respectivo

número de ocupantes promediado como parámetro inicial para correr la simulación. Los tiempo resultantes de la corrida se muestran en la tabla 3.10.

Salón	1O-05	SO-08
Número de ocupantes	22	25
Tiempo de último ocupante en salir (s)	61,6	58,4

Tabla 3.10: Tiempos de salida arrojados por el simulador

El salón 1O-05 es desalojado en 61,6 segundos. Este valor será igual por cada corrida que se haga, dado que el modelo es determinístico. Para obtener resultados distintos es necesario cambiar los valores iniciales de los parámetros. En todo caso, se puede ver que al tener una cantidad inicial de 22 ocupantes, la simulación arroja un tiempo de desalojo muy cercano al del sistema real que es de 59,1 segundos. Al promediar el tiempo del sistema real con el tiempo que arroja el simulador se obtiene un valor de 60,35 segundos, reflejando una dispersión media de 1,25 segundos; un valor relativamente pequeño. Por otra parte, se observa que el salón SO-08 es desalojado en 58,4 segundos. Este valor comparado con los 61,0 segundos de tiempo de desalojo del sistema real, representa una dispersión media de 1,3 segundos. Al igual que en el caso anterior ambos tiempos son cercanos, lo cual permite considerar que las salidas emitidas por el modelo son aceptables.

Capítulo 4

Descripción y análisis de escenarios

En este capítulo se contemplan diferentes situaciones bajo las cuales puede ser efectuado un proceso de evacuación. Para ello se lleva a cabo la modificación de los valores de algunos parámetros del sistema, con la finalidad de observar cambios importantes que se producen en el desalojo del edificio. Las observaciones de estos cambios son centradas en los datos de las salidas. Dichos datos involucran la cantidad de ocupantes que cruzan una puerta, la población de los espacios por cada paso de simulación, cantidad de personas que salen del Ala Oeste, tiempo de salida del sistema, secuencia de espacios transitados y niveles de ocupación en las zonas de mayor concurrencia. Se plantean cuatro escenarios, en los cuales el comportamiento de cada ocupante puede variar y por ende producir mediciones distintas para cada prueba.

4.1 Primer escenario

Los parámetros del sistema son ajustados a los datos descritos en el capítulo 3. Todas las salidas están disponibles y la proporción de los tipos de ocupantes se mantiene en un 90% para ocupantes informados y un 10% para ocupantes desinformados. Se realiza la simulación con un total de 772 personas correspondientes al promedio de la muestra realizada para un día Jueves entre 8:00 y 9:00 a.m.. La velocidad máxima es de 2,0 metros por segundo, la resolución espacial es de 1,0 metros y el paso de simulación es igual a 0,1 segundos.

Luego de haber asignado los valores de los parámetros del sistema, se inició la corrida de la simulación para un tiempo máximo de 500 segundos. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 4.1.

Número de ocupantes que desalojan el Ala Oeste	729
Número de ocupantes informados desalojados	672
Número de ocupantes desinformados desalojados	57
Tiempo del 1er ocupante en salir (s)	1,1
Tiempo del último ocupante en salir (s)	313,6
Número de ocupantes evacuados por el sótano	298
Número de ocupantes evacuados por el 2do piso	197
Número de ocupantes evacuados por el 1er piso	178
Número de ocupantes evacuados por otros espacios	56

Tabla 4.1: Salidas del primer escenario ($V = 2,0 \text{ m/s}$)

De igual forma, para este escenario se plantea la reducción de la velocidad máxima a 1,2 metros por segundo, estableciendo un movimiento de circulación normal, para el cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Número de ocupantes que desalojan el Ala Oeste	716
Número de ocupantes informados desalojados	660
Número de ocupantes desinformados desalojados	56
Tiempo del 1er ocupante en salir (s)	1,9
Tiempo del último ocupante en salir (s)	342,0
Número de ocupantes evacuados por el sótano	297
Número de ocupantes evacuados por el 2do piso	185
Número de ocupantes evacuados por el 1er piso	178
Número de ocupantes evacuados por otros espacios	56

Tabla 4.2: Salidas del primer escenario ($V = 1,2 \text{ m/s}$)

La diferencia en los resultados es comprensible, ya que al tener un límite superior de velocidad menor al primero, el desplazamiento implica mayor tiempo.

En cuanto al nivel de ocupación que se presenta en las zonas más concurridas, sale a relucir el caso de los pasillos. Inicialmente el número de ocupantes en estos sectores es pequeño, pero a los pocos segundos de iniciarse la simulación comienza a crecer hasta alcanzar un punto máximo. Este comportamiento es normal, debido a que todos los recintos del edificio tienen como espacio de salida algunos de los mencionados pasillos. La ocupación de estos sectores para una velocidad de 2,0 metros por segundo, puede observarse a través de distintas figuras para su respectivo análisis.

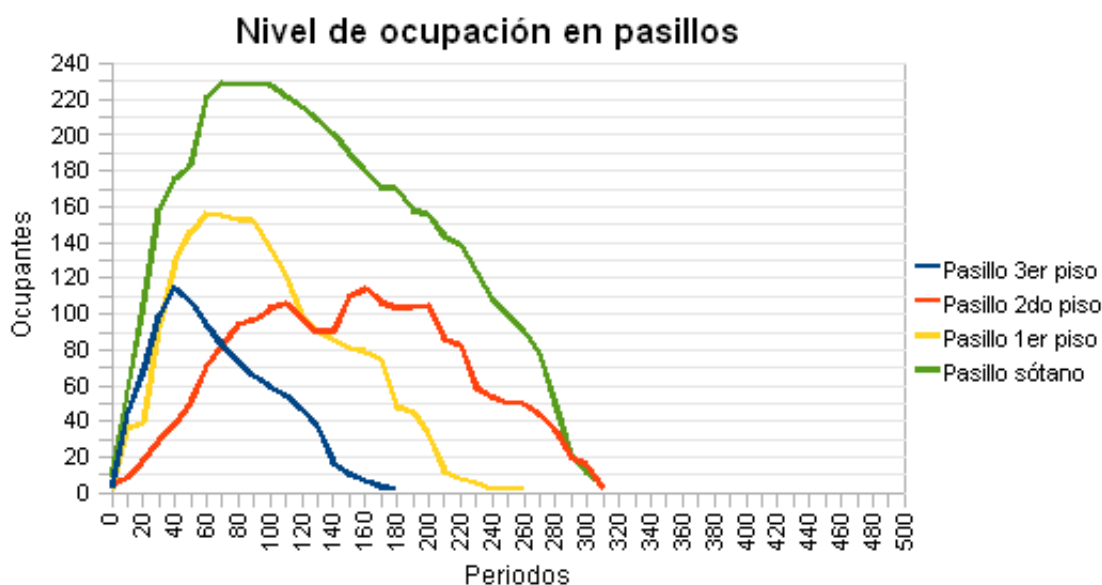


Figura 4.1: Nivel de ocupación en los pasillos del Ala Oeste para el primer escenario

Al estudiar la figura 4.1, se observa como la ocupación en los pasillos del tercer y segundo piso aumenta una más rápida que la otra. Esto se debe a la capacidad de acceso que existe hacia ellos. Ambos pasillos alcanzan un número elevado de ocupantes en algunos instantes de tiempo. Para el tercer piso, el aumento es rápido pero la disminución del número de ocupantes también lo es. En este caso no existen entidades de otros pasillos que lleguen a él. De modo contrario, el pasillo del segundo piso no sólo es concurrido por quienes ocupan sus dependencias, sino también por los que se desplazan desde algunas escaleras y el nivel superior, siendo éste el motivo por el cual luego de comenzar a descender la curva de ocupación a los 110 segundos, aumenta de nuevo 40 segundos más tarde. En el tercer piso el número máximo de ocupantes

se alcanza entre los 30 y 40 segundos después de haber comenzado la simulación con un total de 115. En el segundo piso se obtiene un máximo de 114 ocupantes una vez transcurridos 160 segundos de simulación. Su ocupación llega a ser nula luego de los 300 segundos.

En la misma imagen se observan los niveles de ocupación para los pasillos del primer piso y del sótano. Para el primero se alcanza un número máximo de 156 ocupantes, provenientes de sus dependencias, del segundo piso y del tercer piso (por el recorrido de ocupantes desinformados). El nivel de ocupación disminuye hasta anularse luego de 260 segundos. En el pasillo del sótano entre los 70 y 100 segundos se registra la cantidad de 229 entidades, siendo éste el número mayor de ocupantes para un espacio del edificio. La diferencia en el número de ocupación con respecto a los otros pasillos era de esperarse, pues no sólo transitan por él ocupantes de sus dependencias, sino también ocupantes desinformados provenientes de todos los niveles superiores. En ese mismo rango de tiempo dicho pasillo contiene al 30% de las entidades totales y la disminución de la ocupación se realiza de una manera prolongada.

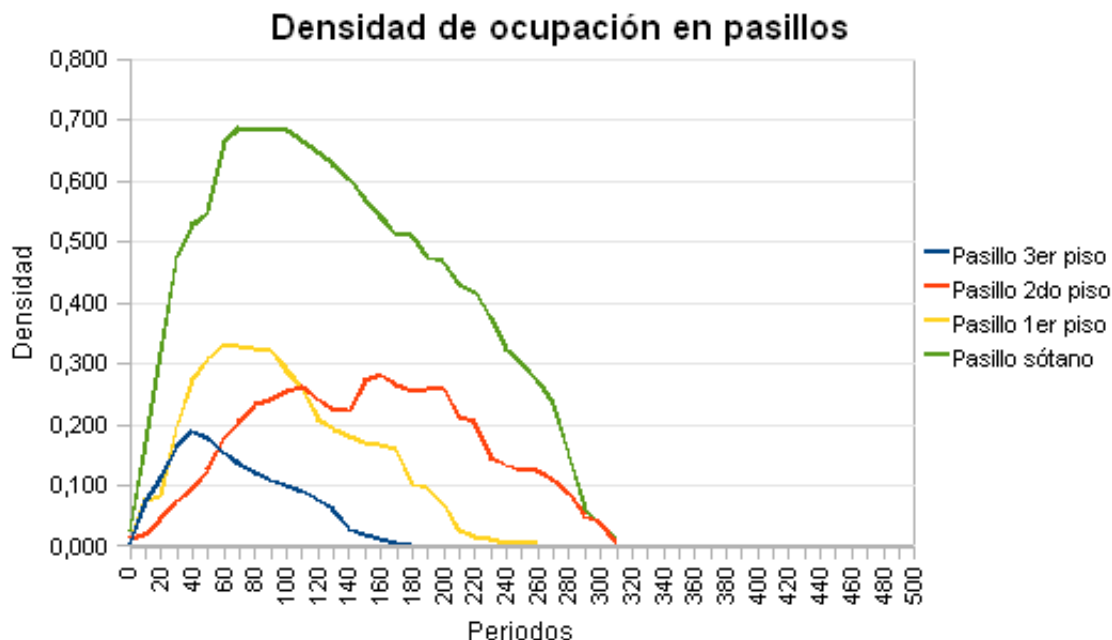


Figura 4.2: Densidad de ocupación en los pasillos del Ala Oeste para el primer escenario

A través de la figura 4.2 se pueden ver los valores de ocupación de los sectores

más críticos del Ala Oeste pero en términos de la densidad de ocupación, es decir, la cantidad de personas por metro cuadrado registrada en cada uno de los pasillos. Para el pasillo del tercer piso, el cual abarca un área de 605,1 metros cuadrados, se obtiene una densidad máxima de 0,190 personas por metro cuadrado a los 40 segundos de haber comenzado la simulación. El pasillo del segundo piso que cuenta con 404,4 metros cuadrados de extensión, registra un valor máximo de densidad igual a 0,282 personas por metro cuadrado en un tiempo igual a 160 segundos. En el primer piso donde su pasillo tiene una extensión de 471,9 metros cuadrados, se obtiene una densidad de ocupación igual a 0,331 personas por metro cuadrado luego de transcurridos los primeros 60 segundos de ejecución del modelo. Para el pasillo del sótano comprendido por un área de 333,0 metros cuadrados, la densidad de ocupación alcanza las 0,685 personas por metro cuadrado en un periodo que va entre 70 y 100 segundos. Ninguno de estos valores supera el punto crítico en el cual puede llegar a anularse la velocidad de un ocupante que es de 3,5 personas por metro cuadrado. El área que comprende estos sectores es lo suficientemente grande para alojar a las entidades que transitan por ellos, incluso si se tuviera a la cantidad total de involucrados en el sistema que es de 772 ocupantes en el pasillo con menor extensión, la densidad de ocupación se ubicaría en las 2,318 personas por metro cuadrado, con lo cual la velocidad de un ocupante se reduciría de 2,0 a 0,8 metros por segundo aproximadamente. Los tiempos en los cuales se hace nula la densidad de ocupación, se corresponden con aquellos en los que el nivel de ocupación en los pasillos desaparece.

4.2 Segundo escenario

El segundo escenario plantea un cambio en la configuración inicial del edificio, a través de la obstrucción de la salida principal del segundo piso. En este caso los ocupantes informados deberán dirigirse a las escaleras, tomando como destino aquella que este más cercana a su posición actual. Los datos resultantes para este escenario con una velocidad límite superior de 2,0 metros por segundo, son mostrados a continuación:

Este ejemplo indica que el desalojo es por unos cuantos segundos más rápido que en el primer escenario. El número de ocupantes que cruza la salida del pasillo del

Número de ocupantes que desalojan el Ala Oeste	720
Número de ocupantes informados desalojados	662
Número de ocupantes desinformados desalojados	58
Tiempo del 1er ocupante en salir (s)	1,1
Tiempo del último ocupante en salir (s)	307,3
Número de ocupantes evacuados por el sótano	299
Número de ocupantes evacuados por el 2do piso	0
Número de ocupantes evacuados por el 1er piso	365
Número de ocupantes evacuados por otros espacios	56

Tabla 4.3: Salidas del segundo escenario

sótano se aproxima al del escenario anterior, mientras que en la salida del primer piso se observa un aumento considerable de entidades que la utilizan, ya que todos los ocupantes informados del segundo y tercer piso desalojan el edificio por allí. En la figura que se muestra a continuación se pueden observar los niveles de ocupación de cada pasillo:

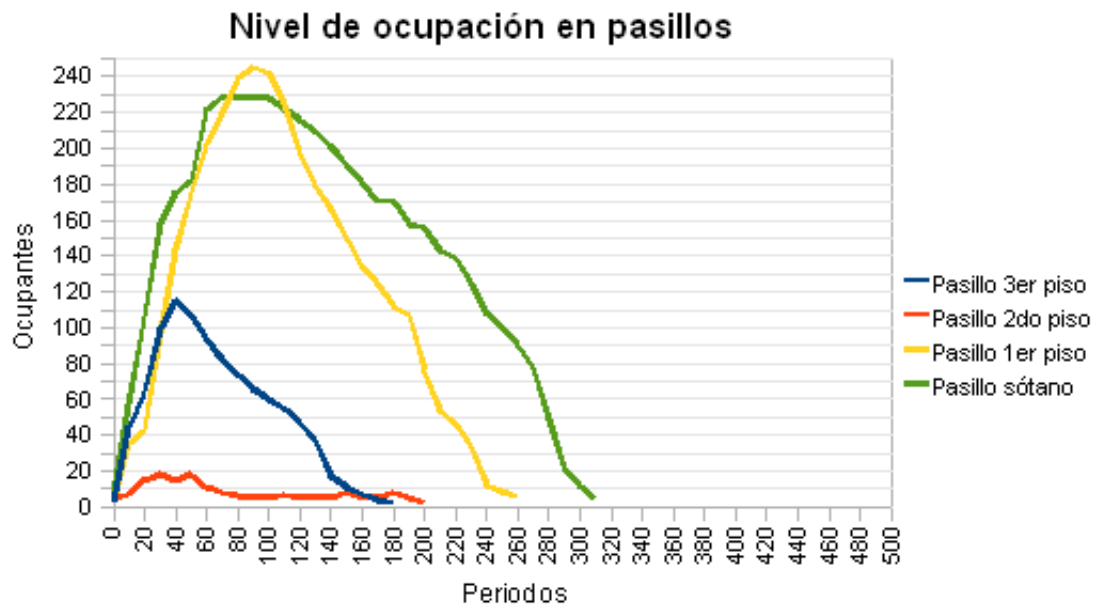


Figura 4.3: Nivel de ocupación en los pasillos del Ala Oeste para el segundo escenario

La figura 4.3 muestra los niveles de ocupación de todos los pasillos del Ala Oeste.

Para el tercer piso el comportamiento de la curva es similar al que se obtiene en el primer escenario. No existen más espacios de los cuales se pueda recibir algún tipo de ocupante; sólo llegan al pasillo personas provenientes de las dependencias de ese piso. Para el pasillo del segundo piso hay un comportamiento totalmente diferente debido a que su salida principal esta bloqueada. Esta situación obliga a los ocupantes a dirigirse hacia las escaleras para llegar al primer piso o al sótano, con la cual el número máximo de ocupantes registrados es igual a 18, además de que la población inicial en todos los recintos del segundo piso es muy baja.

Por otra parte, puede observarse un aumento significativo de la cantidad de entidades que llegan al primer piso. Esto se debe a que los ocupantes informados que no pudieron desalojar el edificio a través de la salida del pasillo del segundo piso, debieron dirigirse al primero para luego continuar su trayecto hacia la salida principal del mismo. Bajo estas circunstancias el número máximo de personas que ocupan este sector llega a las 245 en un periodo que va entre 80 y 100 segundos reteniendo el 31% de los ocupantes involucrados en el modelo. Para el nivel de ocupación del pasillo del sótano se mantienen los valores obtenidos en un desalojo normal, alcanzando un límite superior de 229 personas en un periodo que va entre 70 y 100 segundos.

Mediante la figura 4.4 se puede apreciar la densidad de ocupación en los pasillos. En el tercer piso, su pasillo registra una densidad máxima de 0,190 personas por metro cuadrado a los 40 segundos. En el pasillo del segundo piso se obtiene un valor máximo de densidad igual a 0,045 personas por metro cuadrado en 50 segundos de simulación. En el primer piso se obtiene un punto máximo igual a 0,519 personas por metro cuadrado luego de 90 segundos. Para el pasillo del sótano la densidad de ocupación alcanza las 0,685 personas por metro cuadrado en un periodo que va entre 70 y 100 segundos aproximadamente. Al igual que en el primer escenario, la densidad de ocupación esta muy por debajo de las 3,5 personas por metro cuadrado.

4.3 Tercer escenario

En este caso se plantea el cambio en la configuración del edificio a través del bloqueo de la salida principal del sótano, con lo cual ambos tipos de ocupantes deberán dirigirse

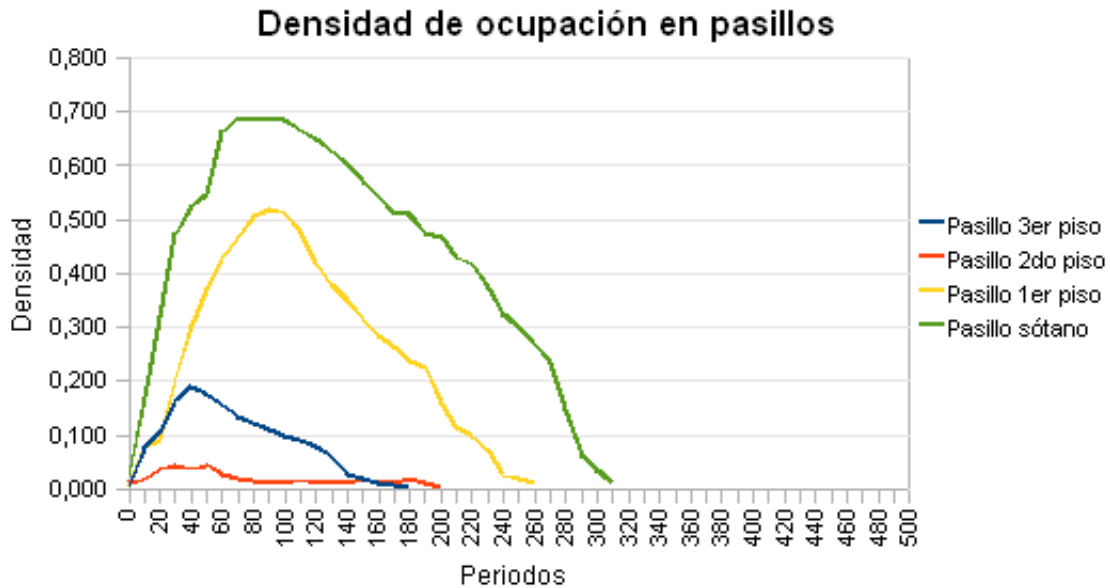


Figura 4.4: Densidad de ocupación en los pasillos del Ala Oeste para el segundo escenario

a las escaleras que los conduce al pasillo del primer piso. Estando allí tomarán como salida la puerta grande de este nivel, ya que seguir subiendo implica un mayor retardo en el desalojo.

A través de la tabla 4.4, se puede observar que los tiempos de salida del primer y último ocupante, coinciden con los valores del primer escenario, pero para la velocidad máxima más baja considerado en éste (*1,2 metros por segundo*). En este caso hay una salida grande no disponible que es la del sótano, pero la velocidad es de 2,0 metros por segundo, con lo cual se justifica la similitud entre estos tiempos. A mayor velocidad, más rápido será el movimiento, independientemente de que el recorrido a transitar sea mayor para algunos ocupantes.

Número de ocupantes que desalojan el Ala Oeste	731
Número de ocupantes informados desalojados	657
Número de ocupantes desinformados desalojados	74
Tiempo del 1er ocupante en salir (s)	1,9
Tiempo del último ocupante en salir (s)	342,0
Número de ocupantes evacuados por el sótano	0
Número de ocupantes evacuados por el 2do piso	185
Número de ocupantes evacuados por el 1er piso	490
Número de ocupantes evacuados por otros espacios	56

Tabla 4.4: Salidas del tercer escenario

En comparación a los valores obtenidos en el primer escenario para una velocidad de 2,0 metros por segundo (similar a la empleada para este caso), se presentan algunas variaciones. El tiempo de salida del último ocupante es 29 segundos mayor, pero el número de personas desinformadas que desaloja el edificio aumenta de 57 a 74. Con estos datos es posible suponer que al verse reducida la longitud de recorrido desde el tercer y primer piso, para este tipo de ocupantes, las probabilidades de salida del edificio aumentan, dado que no deben llegar hasta el nivel más bajo del mismo.

Los niveles de ocupación del tercer piso indicados en la figura 4.5, denotan un ligero cambio, aproximándose a un nivel de ocupación nulo a partir de los 190 segundos. Sin embargo, la tendencia se mantiene en comparación a los escenarios anteriores. Para el pasillo del segundo piso el comportamiento habitual no se ve afectado; los ocupantes informados se dirigen a su salida principal y los desinformados a las escaleras, además de que recibe a los ocupantes provenientes del tercer piso. El valor máximo de ocupación registrado es de 102 personas en un periodo comprendido entre 160 y 170 segundos.

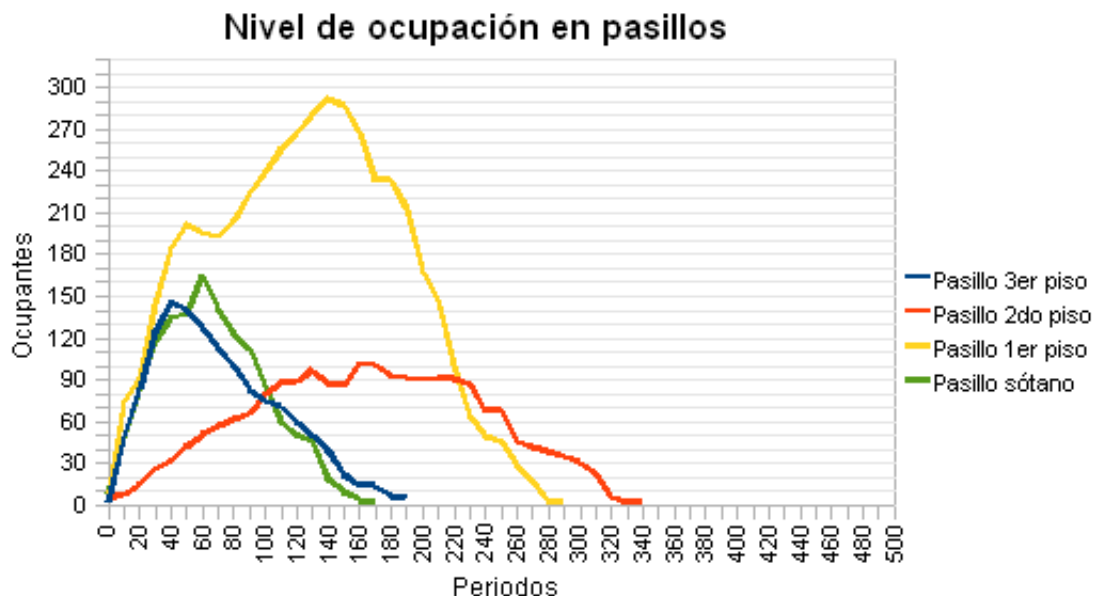


Figura 4.5: Nivel de ocupación en los pasillos del Ala Oeste para el tercer escenario

En este escenario el comportamiento de ocupación registrado en situaciones anteriores entre el sótano y el primer piso, prácticamente se invierte. El motivo radica en que los ocupantes al no ser desalojados por la salida principal del sótano, se dirigen al primer piso. Se puede ver un aumento importante en la ocupación del primer piso, alcanzando un nivel de 292 ocupantes para los 140 segundos de simulación albergando a un 38% del total de ocupantes. Por su parte, la figura 4.5 muestra la disminución de la cantidad de ocupantes que transitan por el pasillo del sótano a un número de ocupación igual a 164 entre 50 y 60 segundos de simulación.

En relación a la densidad de ocupación puede observarse su aumento y disminución en cada uno de los pasillos mediante la figura 4.6. En el tercer piso, su pasillo registra una densidad máxima de 0,241 personas por metro cuadrado a los 40 segundos, siendo un 21% mayor que en escenarios anteriores. Este aumento no significa que llegan ocupantes de otros pisos a dicho pasillo, sino que el desplazamiento del flujo de entidades tuvo un comportamiento más lento. En el pasillo del segundo piso se obtiene un valor máximo de densidad igual a 0,252 personas por metro cuadrado en 160 segundos de simulación acercándose a los 0,282 ocupantes por metro cuadrado obtenidos en un desalojo normal. En el primer piso se obtiene una densidad máxima de ocupación igual

a 0,619 personas por metro cuadrado luego de 140 segundos aumentando en un 50% comparado con el primer escenario ya que todos las entidades del pasillo del nivel más bajo deben desalojar el edificio subiendo al primer piso. Para el pasillo del sótano la densidad de ocupación máxima registrada es de 0,492 personas por metro cuadrado a los 60 segundos de corrida del modelo, disminuyendo el 28% en relación a los escenarios anteriores. En este caso los valores se mantienen muy por debajo de las 3,5 personas por metro cuadrado.

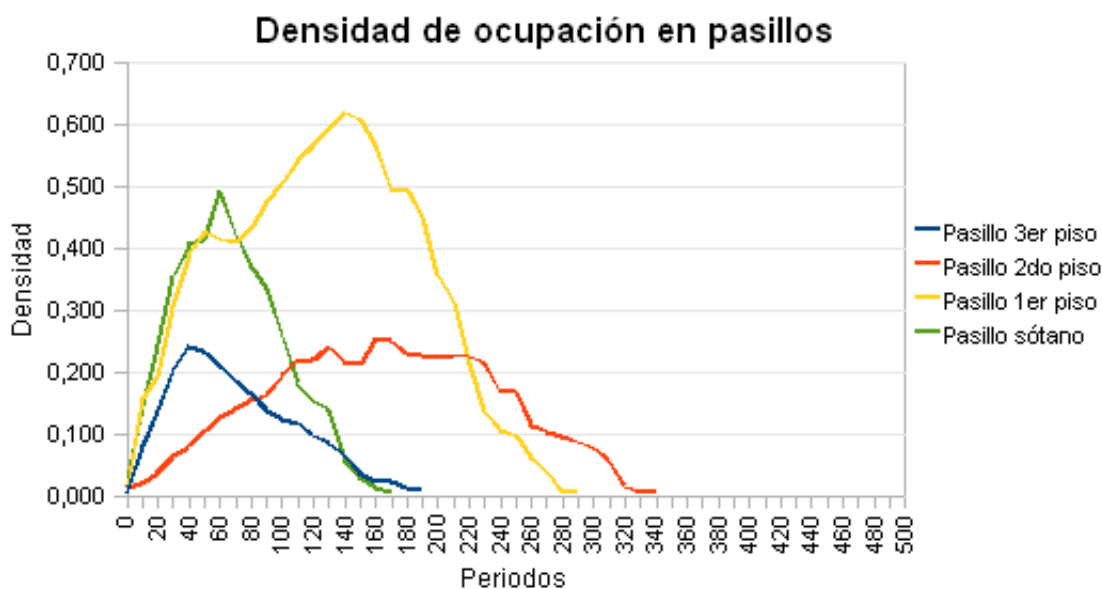


Figura 4.6: Densidad de ocupación en los pasillos del Ala Oeste para el tercer escenario

4.4 Cuarto escenario

Se plantea el desalojo del edificio en forma ordenada, simulando la evacuación a través de cuadrillas de rescate, es decir, suponiendo que el proceso esta siendo dirigido por un grupo especializado. Básicamente se trata de instruir a los ocupantes para que todos aquellos que se encuentran en el tercer y segundo piso, desalojen por la puerta grande del pasillo del segundo, y los que se encuentren en el primer piso y el sótano, lo hagan por la puerta grande del pasillo del nivel más bajo. De esta manera se espera que el tiempo de evacuación se reduzca significativamente. La tabla 4.5 muestra los resultados para una velocidad límite superior de 2,0 metros por segundo.

Número de ocupantes que desalojan el Ala Oeste	719
Número de ocupantes informados desalojados	647
Número de ocupantes desinformados desalojados	72
Tiempo del 1er ocupante en salir (s)	1,1
Tiempo del último ocupante en salir (s)	313,6
Número de ocupantes evacuados por el sótano	449
Número de ocupantes evacuados por el 2do piso	214
Número de ocupantes evacuados por el 1er piso	0
Número de ocupantes evacuados por otros espacios	56

Tabla 4.5: Salidas del cuarto escenario

El valor del tiempo del último ocupante en salir, así como el primero, coincide con los valores de la tabla 4.1 para el primer escenario. Esto puede deberse a que la velocidad empleada en ambos casos es la misma. Por otra parte, como era de esperarse, no se registran salidas por la puerta del pasillo del primer piso y el incremento de uso de las puertas del pasillo del segundo piso y del sótano es significativo. En cuanto a los tipos de ocupantes, se presenta un fenómeno interesante que denota en el aumento de salida de ocupantes del tipo desinformado. Se pudiera concluir que los ocupantes desinformados siguen muy bien las instrucciones puesto que por su poco tiempo de convivencia en el ambiente aun no han desarrollado patrones de conducta ni se han acostumbrado a una ruta de tránsito común. Además el desplazamiento que efectúan es menor, ya que no recorren en su totalidad el espacio comprendido por todas las escaleras. En el caso de los ocupantes informados puede suponerse que el flujo de personas de otro tipo afecta su forma de llegar a las salidas debido a que la densidad de ocupación por sus rutas de costumbre aumenta.

A continuación se muestran los resultados de los niveles de ocupación registrados en este escenario:

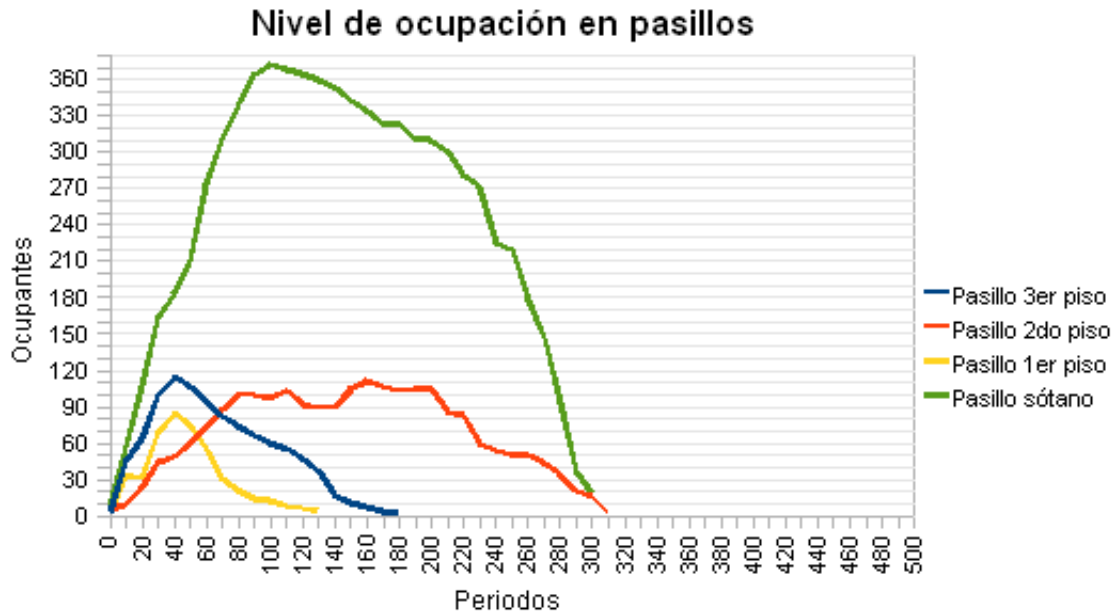


Figura 4.7: Nivel de ocupación en los pasillos del Ala Oeste para el cuarto escenario

El número máximo de ocupantes que se registra para el tercer piso es de 115. El comportamiento es similar al obtenido en el primer y segundo escenario. A los 160 segundos el nivel de ocupación en el pasillo del segundo piso alcanza a los 111 ocupantes. Para este escenario el número de entidades en el segundo nivel aumenta en comparación a un desalojo simple, ya que los ocupantes desinformados provenientes del tercer piso no siguen utilizando las escalera, llegan al pasillo y siguen la ruta de los ocupantes informados. Sin embargo, el aumento es pequeño dada la poca cantidad de ocupantes desinformados que actúan en el sistema. Se mantiene la tendencia del primer y tercer escenario para estos espacios.

Debido al planteamiento de que los ocupantes del primer piso y del sótano desalojen sólo por la salida principal de este último y que los ocupantes desinformados del segundo piso no bajen de nivel, se registra una fuerte disminución en la ocupación del primer piso y un aumento significativo en los niveles registrados para el pasillo del sótano. Es por esta razón que los gráficos muestran un número máximo de 85 ocupantes en el primer piso y una cantidad máxima de 373 ocupantes en el nivel más bajo, lo cual indica que al cumplirse los primeros 100 segundos de simulación, prácticamente la mitad de la totalidad de entidades del modelo se encuentran en el sótano requiriendo 200 segundos

más para desalojarlo completamente. La curva del nivel de ocupación para este pasillo tiene un descenso lento que señala que el flujo de ocupantes se desplazan a velocidades que están por debajo del valor máximo establecido en el modelo que es de 2,0 metros por segundo.

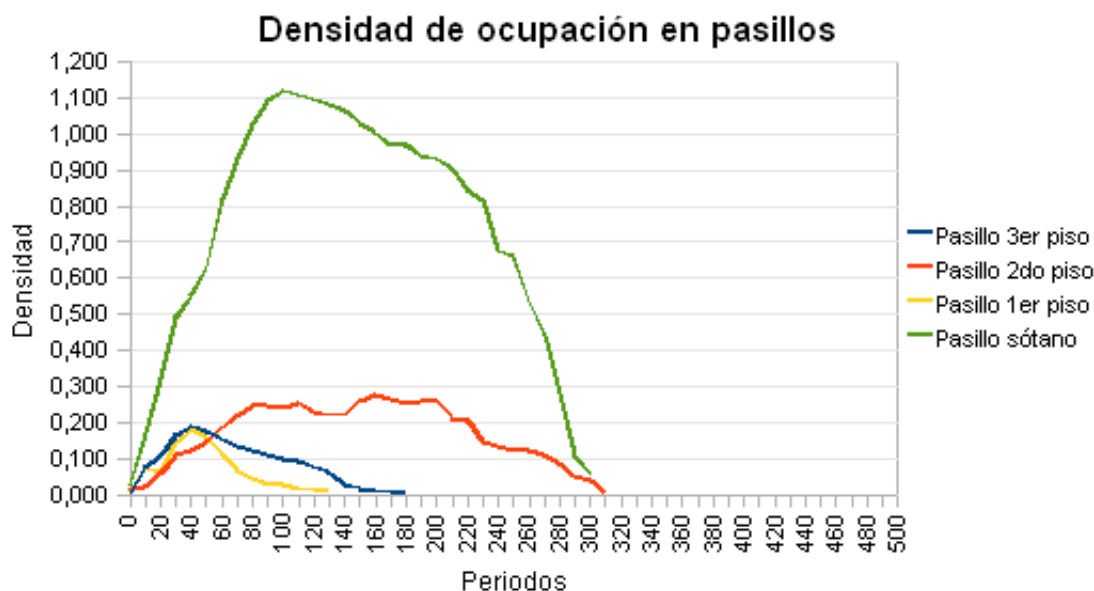


Figura 4.8: Densidad de ocupación en los pasillos del Ala Oeste para el cuarto escenario

La densidad de ocupación para este escenario se observa a través de la figura 4.8. El pasillo del último nivel tiene una densidad máxima de 0,190 personas por metro cuadrado en 40 segundos, similar a los dos primeros escenarios. En el pasillo del segundo piso se obtiene un valor máximo de densidad igual a 0,274 personas por metro cuadrado en 160 segundos de simulación siendo un valor cercano a los obtenidos en el primer y tercer escenario. En el primer piso se obtiene una densidad máxima de ocupación igual a 0,180 personas por metro cuadrado al cumplirse 40 segundos de simulación. Para el pasillo del sótano la densidad de ocupación máxima registrada es de 1,120 personas por metro cuadrado al llegar a los 100 segundos. Es un incremento significativo en relación a escenarios anteriores, sin embargo, todavía esta por debajo del punto crítico de densidad que es de 3,5 personas por metro cuadrado.

4.5 Resumen de los resultados

La tabla 4.6 muestra los resultados obtenidos para los cuatro escenarios planteados, considerando una velocidad máxima de 2,0 metros por segundo y un tiempo de simulación de 500 segundos:

Escenario	1ero	2do	3er	4to
Número de ocupantes desalojados	729	720	731	719
Número de ocupantes informados	672	662	657	647
Número de ocupantes desinformados	57	58	74	72
Tiempo del primer ocupante en salir (s)	1,1	1,1	1,9	1,1
Tiempo del último ocupante en salir (s)	313,6	307,3	342,0	313,6
Porcentaje de error (%)	6,00	7,00	5,00	7,00

Tabla 4.6: Resultados obtenidos en cada escenario

El porcentaje de error corresponde al número de ocupantes que no abandonan la estructura. Esto se debe principalmente a errores del motor de simulación de GALATEA en cuanto al procesamiento de datos en punto flotante y a la forma de cálculo numérico con que fue concebida la librería gSpaces. Luego de realizadas las respectivas correcciones a dicha librería, se logró reducir el porcentaje de error a los valores que se muestran en la tabla 4.6.

A continuación se presentan un conjunto de imágenes que permiten comparar el comportamiento de las curvas de ocupación por cada escenario para un mismo pasillo:

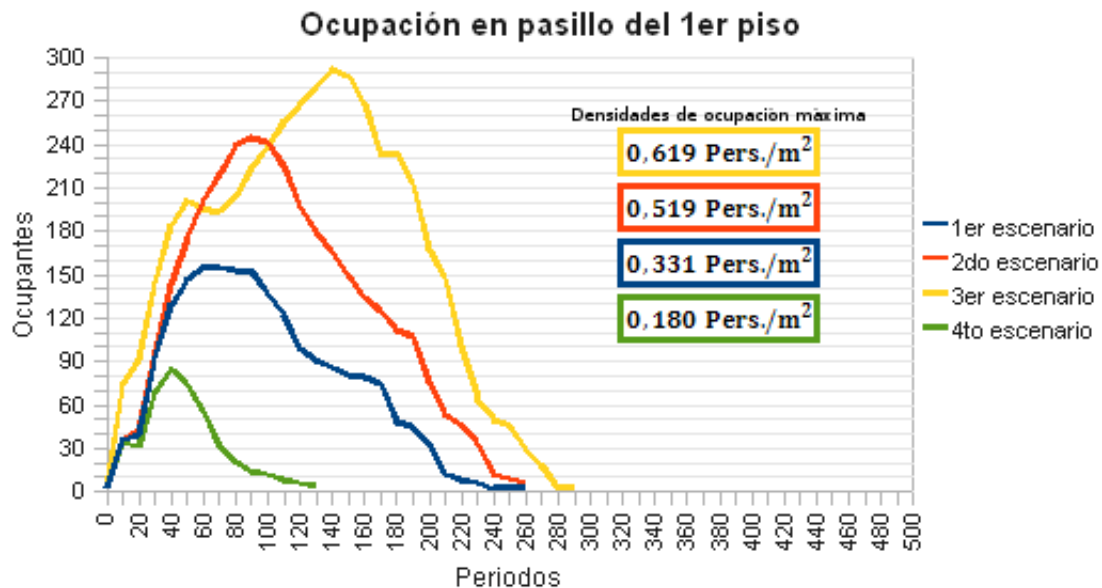


Figura 4.9: Ocupación en el pasillo del 1er piso

En la figura 4.9 se distingue claramente que el nivel de ocupación del pasillo del primer piso difiere en cada uno de los escenarios. Para el primero se tiene como número máximo la cantidad de 156 ocupantes con una densidad de 0,331 personas por metro cuadrado. En el segundo escenario la cantidad máxima de ocupantes se ubica en 245 para un valor de densidad igual a 0,519 personas por metro cuadrado. En la siguiente prueba se registran 292 entidades como máximo y una densidad de ocupación de 0,619 personas por metro cuadrado. Para el último escenario el número máximo de ocupantes disminuye a 85 y por ende la densidad también se reduce llegando a las 0,180 personas por metro cuadrado.

Resulta interesante analizar la densidad que se obtiene al aplicar la cantidad máxima de ocupación en el tercer escenario a sólo un tramo del pasillo del primer piso. Si se utiliza el sector adyacente a las escaleras y el cercano a la salida principal del mismo comprendido por 159,6 metros cuadrados (sombreado en la figura 4.10), se consigue una densidad de ocupación de 1,830 personas por metro cuadrado. Este valor está por debajo del punto en el cual la velocidad puede anularse que es de 3,5 personas por metro cuadrado, pero representa una densidad alta. Sin embargo, de acuerdo a las condiciones establecidas en el modelo, con dicho valor la velocidad bajaría de 2,0 a

1,0 metros por segundo representando una disminución del 50%, es decir, la velocidad todavía no llegaría a ser nula. Si además de esto se revisa la densidad en un sector más pequeño pero igualmente cercano a la salida, comprendido por 90,9 metros cuadrados, se obtiene una densidad de ocupación para 292 ocupantes de 3,212 personas por metro cuadrado, con lo cual la velocidad se reduciría de manera importante llegando a los 0,6 metros por segundo para una disminución del 70%.

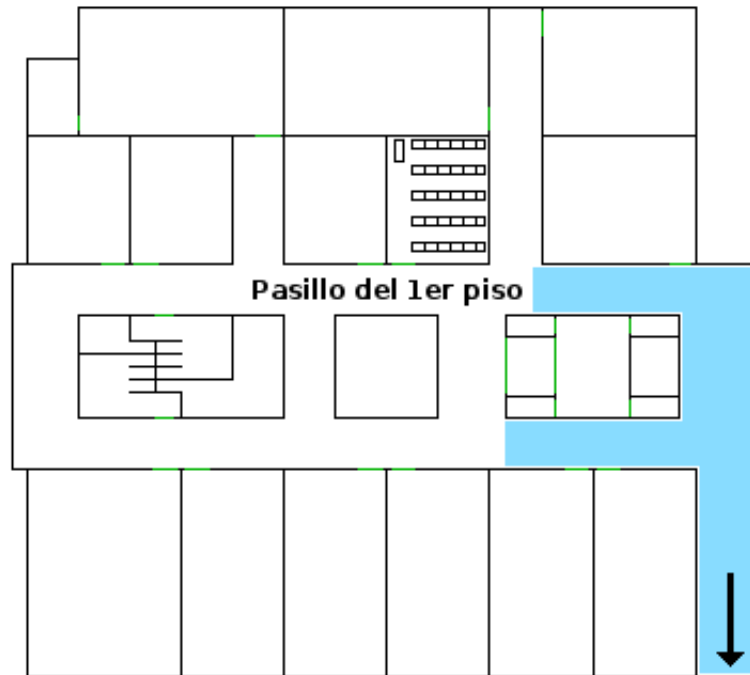


Figura 4.10: Tramo del pasillo del 1er piso

Por medio de la figura 4.11 se observan los niveles de ocupación del pasillo del segundo piso para todos los escenarios. En el primer y cuarto escenario el comportamiento es muy parecido. Entre 70 y 120 segundos de simulación la cantidad máxima de ocupantes en el pasillo del segundo piso esta alrededor del 14% del total de entidades; lo mismo ocurre entre 160 y 210 segundos. Los valores máximos para el primer escenario son de 114 ocupantes y 0,282 personas por metro cuadrado. Para el tercer escenario las curvas mantienen la tendencia del primer y cuarto escenario pero con un mayor retardo en cuanto al aumento y la disminución de la ocupación. El número máximo de ocupantes es igual a 102 y la densidad registrada es de 0,252 personas

por metro cuadrado. En el segundo escenario se tiene un comportamiento totalmente diferente ya que por el segundo piso no se puede efectuar el desalojo. Apenas se alcanza un máximo de 18 ocupantes indicando una densidad de 0.045 personas por metro cuadrado.

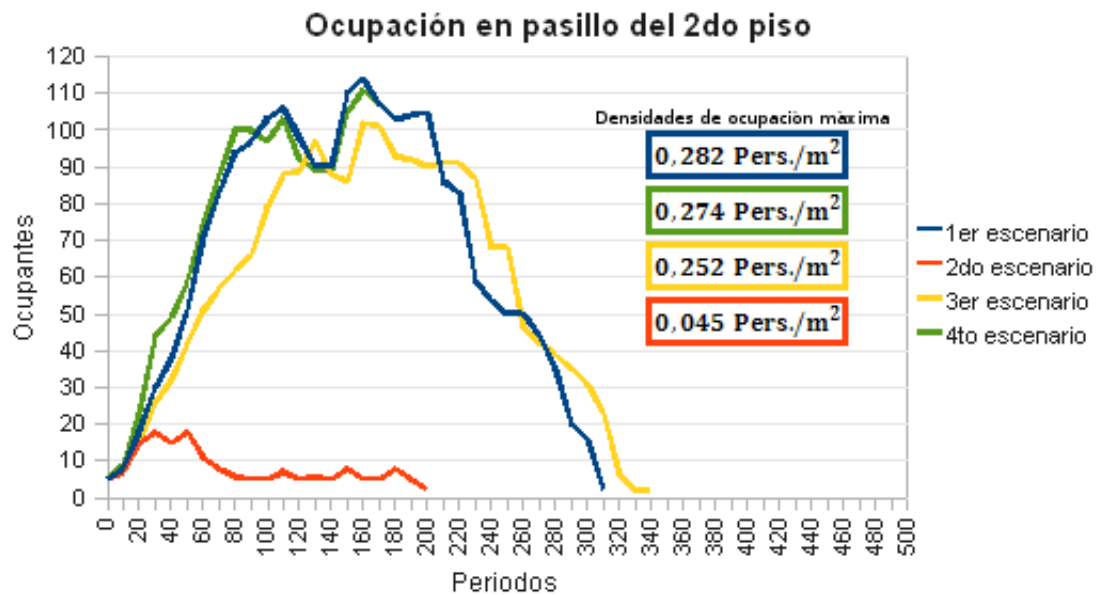


Figura 4.11: Ocupación en el pasillo del 2do piso

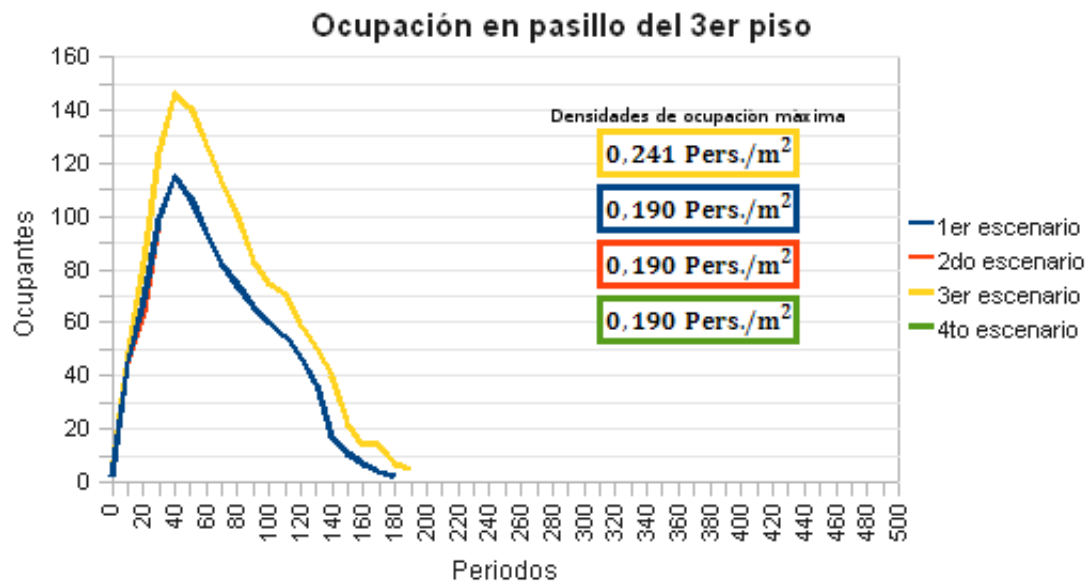


Figura 4.12: Ocupación en el pasillo del 3er piso

Con respecto a las magnitudes registradas en el pasillo del tercer piso se tienen las curvas de ocupación de la figura 4.12. Este pasillo presenta el mismo comportamiento para todos los escenarios, con excepción del tercero en el cual se bloquea la puerta de salida del sótano. En ese tercer escenario la forma de la curva indica que los ocupantes permanecieron aproximadamente 10 segundos más que en los otros casos por lo cual aumenta el número máximo de ocupación de 115 a 147 y la densidad se ubica en 0,241 personas por metro cuadrado.

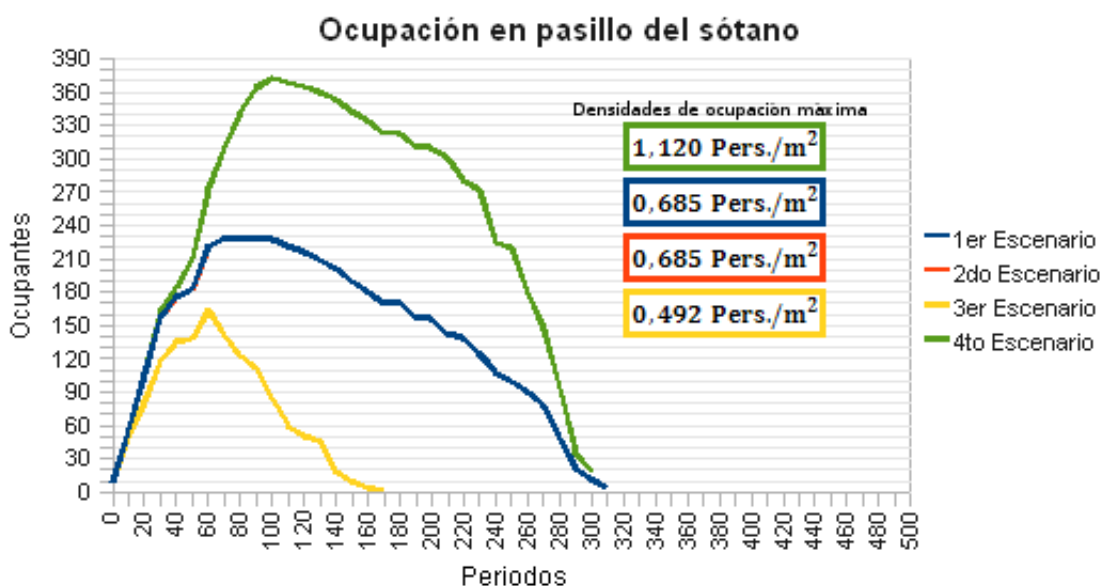


Figura 4.13: Ocupación en el pasillo del sótano

Para el comportamiento de las curvas de ocupación del pasillo del sótano se puede observar la figura 4.13. Este pasillo mantiene valores altos de la cantidad de entidades que transitan por el. En los dos primeros escenarios se registran los mismos valores de ocupación llegando a un máximo de 229 ocupantes con una densidad de 0,685 personas por metro cuadrado. En el tercer escenario como consecuencia del bloqueo de la salida principal del sótano disminuye considerablemente la densidad de ocupación llegando a un máximo de 0,492 personas por metro cuadrado. Finalmente para el cuarto escenario se tienen las magnitudes de ocupación del pasillo del sótano más elevadas del modelo. En este caso la cantidad llega a los 373 ocupantes como máximo con una densidad de 1,120 personas por metro cuadrado. Para el primer, segundo y cuarto escenario según

la forma en que descienden las curvas, se puede deducir que el flujo de ocupación es bastante denso, debiéndose a que sólo hay una salida grande (3 metros) hacia la que se dirigen un número elevado de ocupantes para abandonar el edificio.

También es posible obtener el registro de evacuación del número de entidades que utilizan las salidas principales de cada pasillo. Dicho registro se corresponde con los valores indicados en las tablas de salidas de cada uno de los escenarios. En las figuras 4.14, 4.15 y 4.16 se puede apreciar la forma en la cual aumenta el número de ocurrencias en las salidas generales del Ala Oeste para el primer escenario.

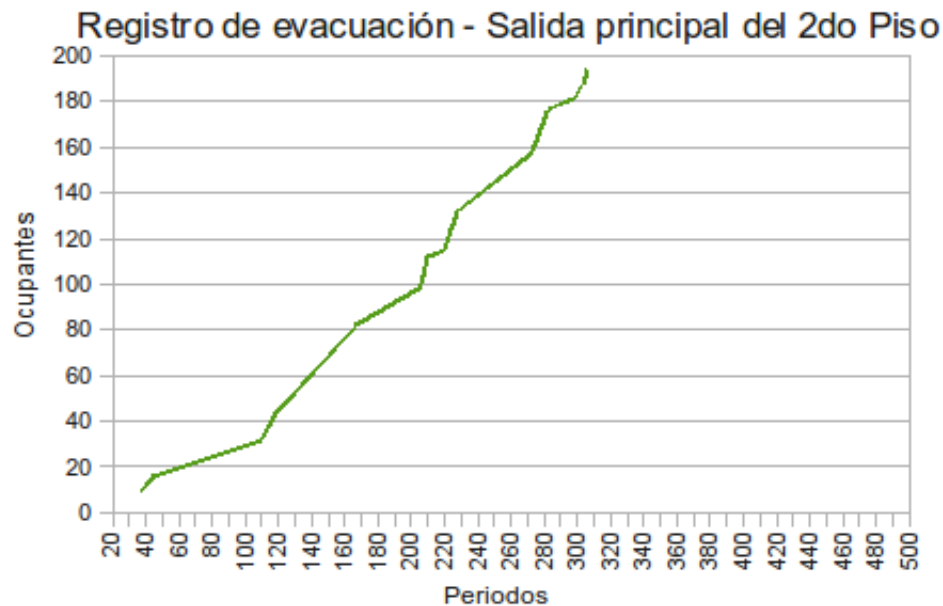


Figura 4.14: Ocupantes desalojados por la salida principal del 2do piso

Se puede apreciar que todas las salidas tuvieron un aumento relativamente constante del número de ocupantes que llegan a ellas. Para la salida principal del segundo piso, la cantidad de ocupantes supera a los 190 luego de 300 segundos. Para la salida del primer piso, la cantidad está por encima de los 177 ocupantes luego de 260 segundos. En cuanto a la salida principal del sótano, el número de veces que se utiliza es igual a 298, para un tiempo superior a los 300 segundos. Para las puertas de salida que también permiten abandonar el Ala Oeste como la del cafetín y su cocina, la del centro de estudiantes y las de dos salones que no se comunican con el pasillo ubicados en el nivel más bajo, se registra un aumento constante que alcanza a las 56 personas en un

tiempo no mayor a los 40 segundos.

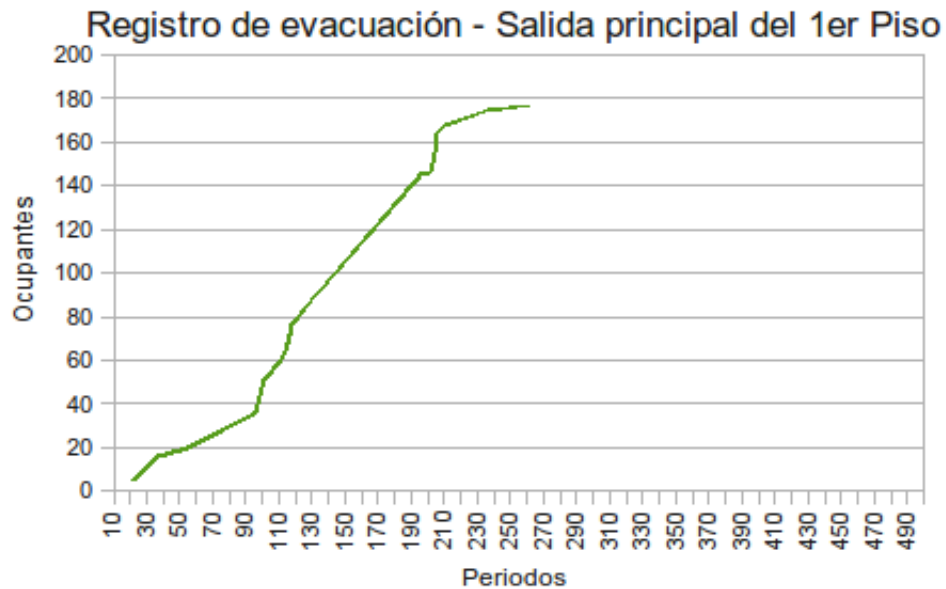


Figura 4.15: Ocupantes desalojados por la salida principal del 1er piso

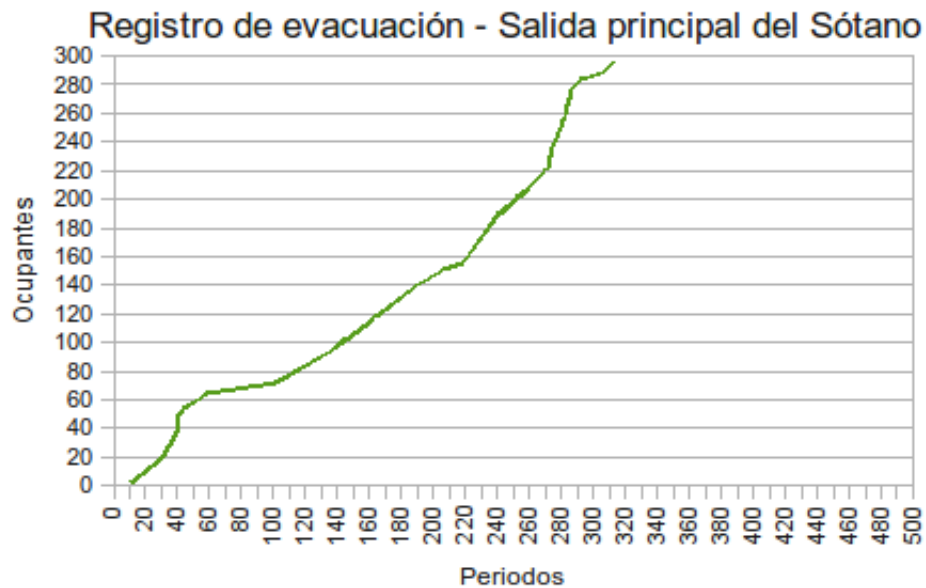


Figura 4.16: Ocupantes desalojados por la salida principal del sótano

Para los demás escenarios el número de cruces en cada una de las puertas de salida del Ala Oeste, se incrementa de forma parecida a como lo hacen para el primer escenario. La diferencia radica en que por ejemplo para la segunda situación planteada

donde se bloquea la puerta de salida del segundo piso, el número de cruces en ésta es nulo, mientras que el número de ocurrencias en las puertas de salida del primer piso y del sótano aumenta de manera constante, pero se incrementa aun más la cantidad de cruces en la salida del primero llegando a los 365. En el tercer escenario al bloquearse la salida principal del sótano, también aumenta de manera constante la cantidad de cruces en las salida del primer y segundo piso pero se incrementa en mayor proporción la cantidad en el primero llegando a los 490. Finalmente para el último escenario donde se lleva a cabo el desalojo controlado que impide salir del edificio utilizando la salida del primer piso, se incrementan de forma continua las salidas de ocupantes a través del sótano y del segundo piso llegando a las 449 y 214 respectivamente.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

El presente trabajo se deriva en una serie de conclusiones y recomendaciones referentes al uso de la metodología de los SMA para el modelado y simulación de la evacuación de edificios, las dificultades que se presentaron durante el desarrollo y la programación del modelo y los resultados obtenidos para los diferentes escenarios de prueba.

La evacuación de un edificio representa un proceso complejo

La evacuación de un edificio representa un proceso con cierto nivel de complejidad. Los responsables de la seguridad y del desalojo de un espacio deben conocer para cada situación de ocupación, las estimaciones de los tiempos de evacuación y las mejores estrategias para la minimización de los mismos. Las características del edificio no necesariamente deben ser siempre las mismas, por lo cual resulta importante analizar detenidamente las consecuencias que traería consigo un desalojo ante posibles bloqueos de salidas, bloqueo de sectores o densidades de ocupación variables. Este análisis puede realizarse a partir de diferentes modelos, efectuando un conjunto de suposiciones razonables que estén ligadas a la asignación de magnitudes de movimiento y determinados tipos de comportamiento. Sin embargo, no son sólo estos los supuestos que involucran el problema, por lo cual es preciso buscar procedimientos flexibles de forma que se puedan evaluar fácilmente cada una de las situaciones consideradas.

El uso de los SMA para la representación de ocupantes

Abordar el problema mediante el uso y la simulación de SMA hizo posible representar la dinámica del movimiento de las personas. Se modelaron diferentes tipos de ocupantes, velocidades y leyes de movimiento, y se representaron determinados sectores de una estructura. Las entidades dinámicas que conformaron el SMA se basaron en el uso de agentes móviles y reactivos, los cuales seleccionan las acciones de acuerdo a las percepciones actuales, ignorando el resto de las percepciones históricas. Su forma de evolución se caracteriza por emplear reglas de condición-acción, que para este estudio en particular estuvieron influenciadas por el estado del entorno, a través de la captación de la densidad de ocupación en cada celda del espacio y la percepción de los límites que pueden cruzarse y aquellos que no. Mediante el uso de esta concepción de agentes, fue posible establecer los comportamientos de los ocupantes haciendo una clasificación general que recoge la forma en la cual pudieran reaccionar y actuar las personas en una situación similar o parecida a algunos de los escenarios planteados. Esta clasificación se hizo de forma concreta, considerando la ocupación de agentes informados y desinformados. Los primeros diseñados con un cierto nivel de experticia en cuanto a la forma de transitar por el espacio, y los segundos concebidos sin ningún tipo de hábito para moverse. Sin embargo, según una serie de estudios que han sido citados a lo largo de este trabajo, se puede decir que ante cualquier eventualidad la mayoría de las personas se comportan de forma parecida. Aquellos que no conocen el entorno utilizan la primera puerta que consiguen y otros siguen al mayor flujo de personas. Por su parte, los que conocen el entorno utilizan sus rutas de salida de costumbre y por lo general se mueven en grupos influenciados por la amistad o el compañerismo.

Creación del SMA por medio de GALATEA y gSpaces

GALATEA y gSpaces permitieron modelar las cualidades de los espacios y de los agentes. No obstante, fue necesario modificar algunas funciones y métodos referentes a la creación de cada uno de los componentes espaciales y a la gestión de los agentes. Las modificaciones fueron las siguientes:

- La clase *Cell* que simula la división reticular de un espacio en donde cada

celda posee la información que un agente necesita para variar sus parámetros de movimiento presentó algunos inconvenientes. Su método encargado de eliminar de una celda a los agentes que ya no pertenecen a ella, seguía buscando agentes en un espacio que ya había sido desalojado totalmente, con lo que se generaba un error de excepción que indicaba que la lista de agentes de dicho espacio estaba vacía. Fue necesario condicionar el método *moving* de esta clase para que primero verificara el estado de la lista; si ésta se encuentra vacía no debe mover ningún agente hacia otra celda de otro espacio (pues ya no existe), pero si la lista no está vacía verifica qué agentes puede remover del espacio y posteriormente los cambia de ubicación. Todo esto realizado en conjunto con la regla de movimiento previamente programada.

- La clase *Space* encargada de simular un espacio con todos sus componentes y retener a los agentes dentro del mismo, fue modificada a través de sus métodos de adición de puertas. Para una puerta unidireccional se debía especificar una probabilidad de salida y otra de entrada. Esto no es necesario ya que si se trata de unidireccionalidad la puerta será utilizada en un sólo sentido. Este simple cambio redujo casi a la mitad el costo de trabajo computacional del simulador. En el caso de que se declare una puerta con dos probabilidades, una de entrada y otra de salida, ésta será considerada por defecto como una puerta bidireccional.
- La clase *MobileAg* que se encarga de crear agentes, no dividía correctamente las proporciones de los tipos de agentes especificadas en el modelo. Para resolver este problema se modificó el método *mTipe*. La nueva forma de dividir a los agentes en distintos tipos, se hace generando números aleatorios con una distribución uniforme entre cero y la longitud del arreglo que contiene los porcentajes de cada tipo. Se recorre la lista que contiene la cantidad total de agentes y se declara una variable entera inicializada con la primera posición del arreglo de porcentajes. Si el porcentaje indicado en esa posición es mayor o igual al número aleatorio generado, entonces al agente se le asigna el tipo indicado por la posición del arreglo que se está verificando, de lo contrario, será designado con el tipo que indica la siguiente posición del arreglo.

- La clase *Move* que representa un nodo con la propiedad de mover agentes invocando la regla modelada por el usuario en cada paso de simulación y que se encarga de simular un plano de dos dimensiones formado por agentes, salidas y obstáculos, también fue objeto de revisión. Su método *setCells* creador de celdas en las que se divide el *Move* no hacía una distribución correcta, ya que utilizaba como valor para determinar el número de celdas en cada eje de coordenadas de un espacio, el módulo de 2. Por ejemplo, si la diferencia entre el valor máximo y mínimo de un espacio en el eje x es un valor decimal, su módulo con respecto al número 2, seguirá siendo un valor decimal, con lo cual el cálculo del número de celdas para ese eje de coordenadas será errado, ya que se requiere que cada uno de los espacios sean divididos en celdas de igual tamaño. Esto generaba problemas en el movimiento de los agentes, impidiendo que se calculara correctamente la trayectoria de recorrido desde un punto inicial hasta una puerta de salida. La solución se resumió en cambiar el número con el que se calculaba el módulo de cada diferencia entre las coordenadas mayores y menores de cada espacio. Se sustituyó el número 2 por el número 1. Si el módulo de 1 es distinto de 0, se convierte el resultado de la diferencia a un valor entero aproximado hacia abajo, es decir, hacia el entero menor, y posteriormente se le suma uno. De esta forma cada espacio que conforma el modelo queda dividido correctamente por celdas de igual magnitud.

Para el caso de las reglas de movimiento la plataforma permitió que se desarrollaran los métodos previamente modelados para este fin. El hecho de que la implementación de clases sea realice a través de *java*, hizo que la programación no se tornara altamente compleja, ya que este lenguaje posee un modelo de objetos relativamente simple y elimina herramientas de bajo nivel, como es el caso de la manipulación directa de punteros o espacios de memoria.

Escenarios planteados

- Para un desalojo simple del Ala Oeste de la Facultad de Ingeniería con la proporción de ocupantes informados y desinformados en un 90% para los primeros

y 10% para los segundos, se consideran niveles de ocupación de los pasillos aceptables, es decir, no se llega a producir ningún tipo de colapso o cercamiento de las vías por las que pueden transitar los ocupantes y ser conducidos a una salida general del sistema. Cada ocupante se dirige a una puerta según su manera de actuar y aumenta o disminuye su velocidad en base a la cantidad de ocupantes que tenga a su alrededor.

- Para el bloqueo de la salida del segundo piso, se consigue un aumento importante del nivel de ocupación del pasillo del primer piso y del número de cruces de ocupantes que desalojan por la puerta de salida de este nivel. Sin embargo, a pesar de contar con una salida menos, el tiempo total de evacuación disminuye sólo por unos cuantos segundos.
- Al bloquear la salida del pasillo del sótano aumenta el nivel de ocupación del primer piso y se incrementa el número de ocurrencias de ocupantes en la salida del mismo. Además aumenta el tiempo total de evacuación con respecto a los dos escenarios anteriores. En este escenario, al tomar sectores reducidos del pasillo del primer piso para analizar la densidad de ocupación, se consiguen valores cercanos al punto crítico en el cual el movimiento puede llegar anularse.
- Para un desalojo controlado empleando sólo las puertas del segundo piso y del sótano, se disminuye considerablemente el nivel de ocupación del pasillo del primer piso. De forma contraria, la densidad de ocupación en el pasillo del sótano aumenta a niveles importantes y en consecuencia el número de ocupantes que utiliza su salida para abandonar el edificio también se incrementa. La puerta de salida del segundo piso registra un número mayor de cruces puesto que los ocupantes desinformados no continúan su recorrido hacia pisos inferiores.

Con estos escenarios se obtuvieron datos que permiten estimar de forma aproximada, cómo sería el desarrollo de una evacuación en los sectores empleados. Hay algunas disminuciones o aumentos de tiempos de evacuación que pueden ayudar a esclarecer algunas dudas sobre el establecimiento de las mejores rutas de evacuación, y si es posible, tomar en consideración la creación de nuevas vías de escape, como por

ejemplo: rampas para reducir el uso de escaleras, puentes que conecten algunos pisos con las laderas que rodean a la Facultad o la habilitación de nuevas puertas de salida.

Recomendaciones

- Planificar un simulacro de evacuación por lo menos en el Ala Oeste de la Facultad de Ingeniería que es el sector de ocupación más importante del edificio en su totalidad. Con los datos que se registren de esa actividad, se podrá validar el modelo para cada uno de sus espacios y niveles de elevación, además de que se educará al colectivo sobre la mejor forma de abandonar la estructura.
- Puede considerarse el uso de otra plataforma de desarrollo de SMA que no requiera de mucho tratamiento para lograr los objetivos. Incluso se puede tomar en cuenta la posibilidad de desarrollar una aplicación propia, con lo cual se lograría tener un mayor control de la implementación del modelo.
- El modelo puede extenderse para buscar un mayor nivel de inteligencia en el comportamiento de los agentes. Por ejemplo, usando una base de conocimientos en la cual cada agente tome en cuenta sus acciones y percepciones pasadas para poder llevar a cabo cualquier acción en el futuro.
- El hecho de que en la simulación se encuentren densidades altas, nos da la idea de que en una evacuación real pudieran haber bloqueos de personas y más cuando la evacuación no sea necesariamente por un sismo sino por un incendio o por el escape de una sustancia tóxica que se espase alrededor de su área de ocupación. Esto haría que la gente se sintiera cada vez más nerviosa e intente escapar lo más pronto posible, pudiendo generar colapso en algunas zonas del edificio. Por eso, como recomendación importante para la Facultad, las áreas donde se dan esas densidades deberían estar pintadas de una forma especial y estar bien señalizadas para que en la eventualidad de una necesaria evacuación la gente pueda ubicarse rápidamente y fluya de la mejor manera posible.

Bibliografía

- Bellifemine, F., Caire, G., y Trucco, T. (2007). Jade programmer's guide. Visitado el día 8 de febrero de 2009, URL: <http://jade.tilab.com/doc/index.html>.
- Berlin, G. (1980). A network analysis of building egress system. *ORSA/TIMS*, 1(1):8–20.
- Botti, J. y Julián, V. (2000). Agentes inteligentes: el siguiente paso en la inteligencia artificial. *Novatica*, 25(145):95–99.
- Brazier, F., Dunin, B., Jennings, N., y Treur, J. (1997). Desire: Modelling multi-agent systems in a compositional formal framework. *Journal of Cooperative Information Systems*, 6(1):67–94.
- Burmeister, B. (1996). Models and methodologies for agent-oriented analysis and design. Technical report, D-96-06, DFKI.
- Camacho, J. (2008). Estudio del uso de sistemas multiagentes para el modelado del tráfico de autos. Proyecto de Grado EISULA, Universidad de Los Andes, Escuela de Ingeniería de Sistemas, Mérida, Venezuela.
- Casadesús, S. (2005). *Consideraciones en torno a los modelos para el estudio de la evacuación de edificios*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Castro, J., Kolp, M., y Mylopoulos, J. (2002). *Towards requirements-driven information systems engineering: The Tropos project*. Information Systems, Elsevier.
- Chaturvedi, A., Filatyev, S., Gore, J., Hanna, A., Means, J., y Mellema, A. (2005). Integrating fire, structure and agent models. *Springerlink*, 3515(0302-9743):695–702.

- Dávila, J., Tucci, K., y Uzcátegui, M. (2004). Simulación multi-agente con galatea.
- EURESCOM (2000). Methodology for engineering systems of software agents. Technical report, P907-D1, EURESCOM.
- Franklin, S. y Graesser, R. (1996). It is an agent, or just a program?: A taxonomy for autonomous agents. *Springer-Verlag*, pages 193–206.
- Fruins, J. (1993). The causes and prevention of crowd disasters. *Proceedings of Engineering for Crowd Safety*, 2(2):99–108.
- Guía, M. (2005). Vulnerabilidad sísmica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes. Proyecto de Grado para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Iglesias, F. (1998). *Definición de una metodología para el desarrollo de sistemas multi-agente*. PhD thesis, Departamento de Ingeniería de Sistemas Telemáticos. Universidad Politécnica de Madrid.
- Kaelbling, L. (1993). *Learning in Embedded Systems*. MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- Laffaille, K. (2005). Gspaces, meta - modelo para simular desalojos de espacios urbanos y arquitectónicos basado en GALATEA. Master's thesis, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Laffaille, K., Tucci, K., Uzcátegui, M., y Dávila, J. (2006). Gspaces: A meta-model for simulating agent mobility in urban or architectonic designs.
- Laffaille, K., Tucci, K., Uzcátegui, M., Dávila, J., y Nava, M. (2005). Simulación de desalojos en la Ciudad Universitaria de Caracas. Visitado el día 20 de enero de 2009, URL: http://www.todoarquitectura.com/revista/42/sp03_Simulacion.asp.
- Lind, J. (1999). *MASSIVE: Software Engineering for Multi-agent Systems*. PhD thesis, DFKI. Alemania.
- Maes, P. (1991). The agent network architecture. *SIGART Bulletin*, 2(4):115–120.

- Maes, P. (1994). Modeling adaptive autonomous agents. *Artificial Life*, 1:135–162.
- Marchetti, T. y García, A. (2003). Evaluación de plataformas para el desarrollo de sistemas multiagente. *CACIC*.
- Nwana, H. S. (1996). Software agents: An overview. *The Knowledge Engineering Review*, 11(3):1–42.
- Pérez, F., López, A., Peter, E., y Morillo, R. (2005). Simulación del movimiento de personas aplicado a la evacuación de buques. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 2(4):78–88.
- Quintero, A., Rodríguez, S., y Ucrós, M. (2003). Agentes y sistemas multiagente: integración de conceptos básicos. Visitado el día 20 de agosto de 2009, URL: <http://agamenon.uniandes.edu.co/yubarta/agentes/agentes.htm>.
- Russell, S. y Norvig, P. (2004). *Inteligencia Artificial. Un Enfoque Moderno*. Pearson, Madrid, España.
- Schreiber, A. (2000). *Engineering of Knowledge and Management: The COM-MONKADS Methodology*. MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- Thompson, P. y Marchant, E. (1995). Testing and application of the computer model simulex. *Fire safety Journal*, 24(4):149–166.
- Tolosa, G. y Bordignon, F. (1999). Revisión: tecnología de agentes de software. *Ciencias de la Información*, 28(3):302–309.
- Varas, A., Cornejo, M., Mainemer, D., Toledo, B., Rogan, J., Muñoz, V., y Valdivia, A. (2007). Cellular automaton model for evacuation process with obstacles. *Physica A*, 1(382):631–642.
- Weiss, G. (1999). *Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence*. MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- Wilensky, U. (1999). Netlogo user manual version 4.0.4. Visitado el día 16 de enero de 2009, URL: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/>.

- Wood, M. (2000). *Multiagent Systems Engineering: A Methodology for Analysis and Design of Multiagent Systems*. PhD thesis, Air Force Institute of Technology. MS Thesis.
- Wooldridge, M. y Jennings, N. (1995). Intelligent agents: Theory and practice. *Knowledge Engineering Review*, 10(2):115–152.
- Wooldridge, M., Jennings, N., y Kinny, D. (1998). *A Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design*. O. Etzioni, J. Muller, and J. Bradshaw, Seattle.
- Wooldridge, M., Jennings, N. R., y Kinny, D. (2000). *The GAIA methodology for agent-oriented analysis and design*. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 3.

Apéndice A

Traza de la simulación

Algunos de los términos que se muestran en pantalla durante la corrida del programa son:

- Tipo 0: ocupantes informados
- Tipo 1: ocupantes desinformados
- x: coordenada en el eje x
- y: coordenada en el eje y
- pasilloS: pasillo del sótano
- pasillo1: pasillo del 1er piso
- pasillo2: pasillo del 2do piso
- pasillog: pasillo de la Escuela de Geológica
- pSP1: puerta de salida del pasillo del 1er piso
- pSP2: puerta de salida del pasillo del 2do piso
- pSPS: puerta de salida del pasillo del sótano
- pSCaf: puerta de salida del cafetín hacia el estacionamiento

- entrepiso3a2: entrepiso ubicado entre el 3er y 2do piso
- escalera1aSA: escalera grande que comunica al 1er piso con el sótano
- escalera3-1: escalera 1 del 3er piso
- escalera3-2: escalera 2 del 3er piso
- escalera2-2: escalera 2 del 2do piso
- tres16: salón 3O-16
- uno1: salón 1O-01
- banoh3: baño para hombres en el 3er piso

Inicio de la simulación

Se crean los espacios y sus celdas. También se crean y se distribuyen los agentes en cada uno de los espacios según su tipo y cantidad. A continuación se muestra parte de la traza que arroja la simulación al inicio de la misma:

```
El deposito1 y su rejilla han sido creados
El tres16 y su rejilla han sido creados
El tres17 y su rejilla han sido creados
El revista y su rejilla han sido creados
El tres14 y su rejilla han sido creados
El postsist y su rejilla han sido creados
El tres13 y su rejilla han sido creados
El sinnombre y su rejilla han sido creados
El tres10 y su rejilla han sido creados
El deposito2 y su rejilla han sido creados
El tres9 y su rejilla han sido creados
El pasillo3 y su rejilla han sido creados
El banoh3 y su rejilla han sido creados
```

```
agente757 Tipo:1 x = 9.44 y = 10.26 (tiempo = 0.0)
agente758 Tipo:0 x = 11.87 y = 3.88 (tiempo = 0.0)
agente759 Tipo:0 x = 13.58 y = 6.59 (tiempo = 0.0)
agente760 Tipo:0 x = 8.99 y = 5.98 (tiempo = 0.0)
agente761 Tipo:0 x = 11.47 y = 9.45 (tiempo = 0.0)
agente762 Tipo:0 x = 12.11 y = 3.12 (tiempo = 0.0)
agente763 Tipo:0 x = 7.4 y = 10.38 (tiempo = 0.0)
agente764 Tipo:0 x = 9.33 y = 5.32 (tiempo = 0.0)
agente765 Tipo:1 x = 12.08 y = 8.97 (tiempo = 0.0)
agente766 Tipo:0 x = 13.23 y = 3.24 (tiempo = 0.0)
agente767 Tipo:1 x = 8.37 y = 10.2 (tiempo = 0.0)
agente768 Tipo:0 x = 10.68 y = 5.68 (tiempo = 0.0)
agente769 Tipo:0 x = 12.11 y = 8.11 (tiempo = 0.0)
agente770 Tipo:0 x = 14.35 y = 3.37 (tiempo = 0.0)
agente771 Tipo:0 x = 8.47 y = 8.45 (tiempo = 0.0)
En tres16>>> EN TOTAL >>> 15 ocupantes, (TIEMPO = 0.0)
agente747 Tipo:0 x = 3.91 y = 14.43 (tiempo = 0.0)
agente748 Tipo:0 x = 12.95 y = 17.48 (tiempo = 0.0)
agente749 Tipo:0 x = 11.82 y = 14.34 (tiempo = 0.0)
agente750 Tipo:0 x = 10.91 y = 11.43 (tiempo = 0.0)
agente751 Tipo:0 x = 9.1 y = 15.6 (tiempo = 0.0)
agente752 Tipo:0 x = 8.33 y = 12.84 (tiempo = 0.0)
agente753 Tipo:0 x = 7.06 y = 17.58 (tiempo = 0.0)
agente754 Tipo:0 x = 6.7 y = 15.22 (tiempo = 0.0)
agente755 Tipo:0 x = 5.54 y = 12.07 (tiempo = 0.0)
agente756 Tipo:0 x = 5.39 y = 17.92 (tiempo = 0.0)
agente338 Tipo:0 x = 36.69 y = 85.67 (tiempo = 0.0)
agente339 Tipo:0 x = 37.38 y = 77.36 (tiempo = 0.0)
agente340 Tipo:1 x = 36.48 y = 75.31 (tiempo = 0.0)
agente341 Tipo:0 x = 41.49 y = 84.48 (tiempo = 0.0)
```

```
agente342 Tipo:1 x = 40.12 y = 82.02 (tiempo = 0.0)
agente343 Tipo:0 x = 39.16 y = 80.15 (tiempo = 0.0)
agente344 Tipo:0 x = 38.75 y = 78.74 (tiempo = 0.0)
agente345 Tipo:0 x = 37.05 y = 76.02 (tiempo = 0.0)
agente346 Tipo:0 x = 41.24 y = 83.23 (tiempo = 0.0)
agente347 Tipo:0 x = 40.04 y = 81.03 (tiempo = 0.0)
agente348 Tipo:0 x = 39.77 y = 79.76 (tiempo = 0.0)
agente349 Tipo:0 x = 38.4 y = 77.39 (tiempo = 0.0)
agente350 Tipo:0 x = 37.95 y = 75.94 (tiempo = 0.0)
En uno1>>> EN TOTAL >>> 13 ocupantes, (TIEMPO = 0.0)
agente336 Tipo:0 x = 12.77 y = 67.77 (tiempo = 0.0)
agente337 Tipo:0 x = 12.85 y = 67.04 (tiempo = 0.0)
En banoh1>>> EN TOTAL >>> 2 ocupantes, (TIEMPO = 0.0)
agente335 Tipo:0 x = 8.85 y = 70.96 (tiempo = 0.0)
En banom1>>> EN TOTAL >>> 1 ocupantes, (TIEMPO = 0.0)
agente334 Tipo:0 x = 37.45 y = 67.67 (tiempo = 0.0)
En entrepiso1aS>>> EN TOTAL >>> 1 ocupantes, (TIEMPO = 0.0)
agente333 Tipo:0 x = 31.63 y = 67.92 (tiempo = 0.0)
En escalera1aSA>>> EN TOTAL >>> 1 ocupantes, (TIEMPO = 0.0)
agente331 Tipo:0 x = 5.69 y = 66.8 (tiempo = 0.0)
agente332 Tipo:0 x = 29.51 y = 71.43 (tiempo = 0.0)
En pasillo1>>> EN TOTAL >>> 2 ocupantes, (TIEMPO = 0.0)
```

Movimiento de los agentes

Se inicia el movimiento de los agentes de acuerdo a su tipo y a la regla de movimiento que posee cada espacio.

```
el agente537 Tipo:0 va a salir de banoh2 (tiempo = 0.1)
el agente340 Tipo:1 va a salir de uno1 (tiempo = 0.2)
```

```
el agente124 Tipo:1 va a salir de cafetin (tiempo = 0.3)
el agente688 Tipo:1 va a salir de tres7 (tiempo = 0.4)
el agente309 Tipo:0 va a salir de banomS (tiempo = 0.6)
el agente354 Tipo:1 va a salir de uno2 (tiempo = 0.7)
el agente157 Tipo:1 va a salir de cafetin (tiempo = 0.7)
el agente284 Tipo:1 va a salir de s8 (tiempo = 0.8)
el agente538 Tipo:0 va a salir de banom2 (tiempo = 0.9)
el agente700 Tipo:1 va a salir de tres4 (tiempo = 1.0)
el agente487 Tipo:1 va a salir de uno7 (tiempo = 1.0)
el agente333 Tipo:0 va a salir de escalera1aSA (tiempo = 1.0)
el agente240 Tipo:0 va a salir de s7 (tiempo = 20.9)
el agente751 Tipo:0 va a salir de tres17 (tiempo = 21.0)
el agente373 Tipo:0 va a salir de uno4 (tiempo = 21.0)
(E)Exit[1]
el agente467 Tipo:0 va a salir de pasillo1
el agente467 Tipo:0 salio del ALA OESTE ->> PUERTA: pSP1 (tiempo = 21.0)
En 21.0 segundos, 5 personas han salido del ALA OESTE por pSP1
el agente655 Tipo:1 va a salir de pasillo3 (tiempo = 21.1)
el agente646 Tipo:0 va a salir de tres3 (tiempo = 21.1)
(E)Exit[1]
el agente543 Tipo:0 va a salir de pasillo2
el agente543 Tipo:0 salio del ALA OESTE ->> PUERTA: pSP2 (tiempo = 21.1)
el agente229 Tipo:0 va a salir de s6 (tiempo = 21.1)
el agente193 Tipo:0 va a salir de s5 (tiempo = 21.1)
(E)Exit[1]
el agente119 Tipo:0 va a salir de cafetin
el agente119 Tipo:0 salio del ALA OESTE ->> PUERTA: pSCaf (tiempo = 21.2)
el agente477 Tipo:0 va a salir de uno10 (tiempo = 21.2)
(E)Exit[1]
el agente167 Tipo:0 va a salir de cafetin
el agente167 Tipo:0 salio del ALA OESTE ->> PUERTA: pSCaf (tiempo = 21.2)
```

el agente573 Tipo:0 va a salir de pasillo3 (tiempo = 21.3)
el agente757 Tipo:1 va a salir de entrepiso3a2 (tiempo = 21.3)

agente507 Tipo:0 x = 44.2 y = 80.6 (tiempo = 130.0)
agente515 Tipo:0 x = 44.19 y = 80.44 (tiempo = 130.0)
agente369 Tipo:0 x = 44.6 y = 86.89 (tiempo = 130.0)
agente503 Tipo:0 x = 44.31 y = 80.88 (tiempo = 130.0)
En pasillo1>>> EN TOTAL >>> 91 ocupantes, (TIEMPO = 130.0)
(E)Exit[1]
el agente443 Tipo:0 va a salir de pasillo1
el agente443 Tipo:0 salio del ALA OESTE ->> PUERTA: pSP1 (tiempo = 130.0)
En 130.0 segundos, 88 personas han salido del ALA OESTE por pSP1
el agente707 Tipo:0 va a salir de pasillo3 (tiempo = 130.4)
el agente621 Tipo:0 va a salir de pasillo3 (tiempo = 130.5)
(E)Exit[1]
el agente80 Tipo:0 va a salir de pasilloS
el agente80 Tipo:0 salio del ALA OESTE ->> PUERTA: pSPS (tiempo = 130.5)
el agente631 Tipo:0 va a salir de pasillo3 (tiempo = 130.6)
el agente764 Tipo:0 va a salir de entrepiso3a2 (tiempo = 130.6)

agente744 Tipo:0 x = 30.99 y = 21.73 (tiempo = 140.0)
agente732 Tipo:0 x = 30.99 y = 21.73 (tiempo = 140.0)
agente740 Tipo:0 x = 30.99 y = 21.72 (tiempo = 140.0)
agente743 Tipo:0 x = 30.99 y = 21.74 (tiempo = 140.0)
agente739 Tipo:0 x = 30.99 y = 21.72 (tiempo = 140.0)
agente731 Tipo:1 x = 31.0 y = 21.62 (tiempo = 140.0)
En escalera3-1>>> EN TOTAL >>> 15 ocupantes, (TIEMPO = 140.0)
agente698 Tipo:0 x = 33.16 y = 26.38 (tiempo = 140.0)
agente627 Tipo:0 x = 33.28 y = 26.38 (tiempo = 140.0)
En escalera3-3>>> EN TOTAL >>> 2 ocupantes, (TIEMPO = 140.0)
agente591 Tipo:0 x = 39.7 y = 26.36 (tiempo = 140.0)

agente582 Tipo:0 x = 39.72 y = 26.34 (tiempo = 140.0)
En escalera3-4>>> EN TOTAL >>> 2 ocupantes, (TIEMPO = 140.0)

agente672 Tipo:1 x = 30.92 y = 70.5 (tiempo = 310.0)
En escalera1aSA>>> EN TOTAL >>> 1 ocupantes, (TIEMPO = 310.0)

agente216 Tipo:0 x = 48.56 y = 73.5 (tiempo = 310.0)
agente207 Tipo:0 x = 48.56 y = 73.5 (tiempo = 310.0)
agente199 Tipo:0 x = 48.56 y = 73.5 (tiempo = 310.0)
agente214 Tipo:0 x = 48.56 y = 73.5 (tiempo = 310.0)
En pasilloS>>> EN TOTAL >>> 4 ocupantes, (TIEMPO = 310.0)
agente243 Tipo:0 x = 90.94 y = 55.49 (tiempo = 310.0)
agente257 Tipo:0 x = 90.97 y = 55.5 (tiempo = 310.0)
En s7>>> EN TOTAL >>> 2 ocupantes, (TIEMPO = 310.0)

(E)Exit[1]

el agente216 Tipo:0 va a salir de pasilloS
el agente216 Tipo:0 salio del ALA OESTE ->> PUERTA: pSPS (tiempo = 312.9)

(E)Exit[1]

el agente214 Tipo:0 va a salir de pasilloS
el agente214 Tipo:0 salio del ALA OESTE ->> PUERTA: pSPS (tiempo = 312.9)

(E)Exit[1]

el agente199 Tipo:0 va a salir de pasilloS
el agente199 Tipo:0 salio del ALA OESTE ->> PUERTA: pSPS (tiempo = 313.0)
En 313.0 segundos, 296 personas han salido del ALA OESTE por pSPS

(E)Exit[1]

el agente207 Tipo:0 va a salir de pasilloS
el agente207 Tipo:0 salio del ALA OESTE ->> PUERTA: pSPS (tiempo = 313.1)

(E)Exit[1]

el agente695 Tipo:0 va a salir de pasillo2
el agente695 Tipo:0 salio del ALA OESTE ->> PUERTA: pSP2 (tiempo = 313.5)

(E)Exit[1]

el agente693 Tipo:0 va a salir de pasillo2

el agente693 Tipo:0 salio del ALA OESTE --> PUERTA: pSP2 (tiempo = 313.6)

Fin de la simulación

La traza muestra cada uno de los agentes que salieron del sistema, en este caso del Ala Oeste de la Facultad de Ingeniería. Luego se indica la cantidad total de ocupantes desalojados.

TIEMPO FINAL DE SIMULACION = 500.0

El Agente163 Tipo:1 --> salio a ZONA SEGURA

El Agente321 Tipo:1 --> salio a ZONA SEGURA

El Agente305 Tipo:1 --> salio a ZONA SEGURA

El Agente542 Tipo:0 --> salio a ZONA SEGURA

El Agente139 Tipo:1 --> salio a ZONA SEGURA

El Agente306 Tipo:1 --> salio a ZONA SEGURA

El Agente143 Tipo:0 --> salio a ZONA SEGURA

El Agente540 Tipo:0 --> salio a ZONA SEGURA

El Agente174 Tipo:0 --> salio a ZONA SEGURA

El Agente145 Tipo:0 --> salio a ZONA SEGURA

El Agente322 Tipo:0 --> salio a ZONA SEGURA

El Agente126 Tipo:0 --> salio a ZONA SEGURA

El Agente539 Tipo:0 --> salio a ZONA SEGURA

Cantidad de personas que salieron de cada tipo:

672 --> de Tipo 0

56 --> de Tipo 1

Numero total de personas que salieron del Ala Oeste: 728

Secuencia de movimiento para un agente específico

La información de la traza puede ser filtrada para estudiar el comportamiento de un agente en particular.

```
agente715 Tipo:0 x = 9.0 y = 34.98 (tiempo = 0.0)
agente715 Tipo:0 x = 9.2 y = 32.99 (tiempo = 10.0)
agente715 Tipo:0 x = 9.4 y = 31.0 (tiempo = 20.0)
el agente715 Tipo:0 va a salir de tres8 (tiempo = 25.2)
agente715 Tipo:0 x = 10.45 y = 29.86 (tiempo = 30.0)
agente715 Tipo:0 x = 12.43 y = 29.58 (tiempo = 40.0)
agente715 Tipo:0 x = 14.4 y = 29.32 (tiempo = 50.0)
agente715 Tipo:0 x = 16.38 y = 29.04 (tiempo = 60.0)
agente715 Tipo:0 x = 18.34 y = 28.78 (tiempo = 70.0)
agente715 Tipo:0 x = 20.32 y = 28.5 (tiempo = 80.0)
agente715 Tipo:0 x = 22.29 y = 28.15 (tiempo = 90.0)
agente715 Tipo:0 x = 24.43 y = 27.72 (tiempo = 100.0)
agente715 Tipo:0 x = 26.39 y = 27.33 (tiempo = 110.0)
agente715 Tipo:0 x = 28.52 y = 26.9 (tiempo = 120.0)
agente715 Tipo:0 x = 30.66 y = 26.47 (tiempo = 130.0)
el agente715 Tipo:0 va a salir de pasillo3 (tiempo = 131.8)
el agente715 Tipo:0 va a salir de escalera3-3 (tiempo = 136.7)
agente715 Tipo:0 x = 33.8 y = 25.62 (tiempo = 140.0)
el agente715 Tipo:0 va a salir de entrepiso3a2 (tiempo = 140.6)
el agente715 Tipo:0 va a salir de escalera3a2A (tiempo = 145.5)
agente715 Tipo:0 x = 62.44 y = 24.61 (tiempo = 150.0)
agente715 Tipo:0 x = 62.74 y = 22.65 (tiempo = 160.0)
agente715 Tipo:0 x = 62.7 y = 20.96 (tiempo = 170.0)
agente715 Tipo:0 x = 60.72 y = 20.73 (tiempo = 180.0)
agente715 Tipo:0 x = 58.75 y = 20.51 (tiempo = 190.0)
agente715 Tipo:0 x = 56.76 y = 20.28 (tiempo = 200.0)
agente715 Tipo:0 x = 54.79 y = 20.05 (tiempo = 210.0)
```

```
agente715 Tipo:0 x = 52.81 y = 19.82 (tiempo = 220.0)
agente715 Tipo:0 x = 50.97 y = 19.47 (tiempo = 230.0)
agente715 Tipo:0 x = 49.21 y = 17.88 (tiempo = 240.0)
agente715 Tipo:0 x = 49.04 y = 16.15 (tiempo = 250.0)
agente715 Tipo:0 x = 49.04 y = 14.15 (tiempo = 260.0)
agente715 Tipo:0 x = 49.02 y = 12.15 (tiempo = 270.0)
agente715 Tipo:0 x = 48.88 y = 10.16 (tiempo = 280.0)
agente715 Tipo:0 x = 48.75 y = 8.18 (tiempo = 290.0)
el agente715 Tipo:0 va a salir de pasillo2
el agente715 Tipo:0 salio del ALA OESTE ->> PUERTA: pSP2 (tiempo = 295.6)
El Agente715 Tipo:0 --> salio a ZONA SEGURA
```

Código del modelo

El código desarrollado para ejecutar el modelo expuesto en este proyecto es libre y gratuito, y puede obtenerse haciendo la solicitud a cualquiera de las siguientes direcciones de correo electrónico: *josemolina@ula.ve*, *isebas@ula.ve*, *hyelitza@ula.ve*.