

TESIS DE MAESTRÍA

# **Diseño y Desarrollo de un Controlador de Grupo de Ascensor Inteligente Basado en Sistemas MultiAgente**

ANDRES ENRIQUE ROSSO MATEUS

4 de Abril de 2013



Pontificia Universidad Javeriana  
Maestría en Ingeniería de Sistemas



---

**Director de tesis**

Prof. Julian Mauricio Angel MsC

**Asesor**

Prof. Dr. Enrique Gonzalez PhD

**Grupo De Investigación TAKINA****Modalidad Investigación**



# Índice general

<b>1. Introduction</b>	<b>1</b>
1.1. Definición del Problema . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo General . . . . .	2
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	2
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>3</b>
2.1. Controladores . . . . .	3
2.1.1. Controlador Basado en Lógica Difusa (CBLD) . . . . .	3
2.1.2. Controlador Basado en Optimización Robusta (CBOR) . . . . .	3
2.1.3. Optimización Por Colonia De Hormigas (OCH) . . . . .	3
2.1.4. Controlador Híbrido Para Grupo De Ascensores (CHGA) . . . . .	3
2.1.5. Control Mediante aprendizaje reforzado (CMAF). . . . .	4
2.2. Simulación . . . . .	4
2.2.1. Técnicas de Simulación . . . . .	5
2.3. Simuladores de Tráfico Vertical . . . . .	5
2.3.1. Tráfico Vertical . . . . .	6
2.3.2. Determinación y Predicción de Tráfico . . . . .	7
2.4. Controladores de Grupo de Elevadores . . . . .	7
2.4.1. Criterios de Optimización en el Transporte Vertical . . . . .	8
2.4.2. Técnicas De Control . . . . .	9
2.5. Sistemas Multi Agente . . . . .	10
2.6. Lógica Difusa . . . . .	11
2.7. Redes Neuronales Artificiales . . . . .	12
<b>3. Simulador de Edificación</b>	<b>15</b>
3.1. Diseño de la Simulación . . . . .	15
3.1.1. Análisis Sistémico . . . . .	16
3.1.2. Componentes del Sistema . . . . .	16
3.1.3. Consideraciones de Diseño . . . . .	16
3.1.4. Técnica de Simulación Escogida . . . . .	16
3.1.5. Proceso General De La Simulación . . . . .	17
3.1.6. Variables de Simulación . . . . .	17
3.1.7. Valores Comunes Para la Simulación . . . . .	20
3.1.8. Componentes del Simulador . . . . .	20
3.2. Implementación de la Simulación . . . . .	21
3.2.1. Principios de Diseño . . . . .	21
3.2.2. Componentes de Software del Simulador . . . . .	21
3.2.3. Modelo de Clases . . . . .	26
3.2.4. Dinámica de Arribo de Pasajeros . . . . .	27
3.2.5. Diseño del Controlador de Grupo de Elevadores . . . . .	27
3.2.6. Criterios De Desempeño . . . . .	28
<b>4. Modelo de Sistema Multi Agente</b>	<b>31</b>
4.1. Descripción General De Los Agentes . . . . .	31
4.1.1. Descripción del Ambiente . . . . .	32

4.1.2. Descripción Detallada de Agentes . . . . .	33
4.2. Interacciones . . . . .	36
4.2.1. Cooperación . . . . .	37
4.3. Inferencia en los Agentes Controladores de Cabina . . . . .	39
4.4. Inferencia en el Agente Arbitro del Sistema . . . . .	43
4.5. Integración Controlador Simulador . . . . .	47
<b>5. Resultados</b>	<b>49</b>
5.1. Introducción . . . . .	49
5.2. Validación del Simulador . . . . .	50
5.2.1. Validación del Generador de Tráfico . . . . .	50
5.3. Protocolo de Experimentación . . . . .	53
<b>6. Conclusiones y Trabajo Futuro</b>	<b>61</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	61
6.2. Trabajo Futuro . . . . .	61
<b>7. Apendice</b>	<b>63</b>
7.1. Definiciones Principales . . . . .	63
7.2. Tomas de Pantalla Simulador . . . . .	64
<b>Bibliografía</b>	<b>69</b>

# 1 Introduction

Actualmente las edificaciones de gran altura enfrentan el problema de transportar satisfactoriamente a los usuarios entre los pisos. Este transporte tiende a complicarse debido a la gran demanda que tiene el sistema y la considerable distancia que deben recorrer los ascensores. Entre los factores más importantes que impulsan el aumento de construcciones de gran altura están:

- Escasez de terrenos disponibles.
- Alto precio de los terrenos.
- Densidad poblacional.
- Nuevas tendencias.

Las edificaciones de gran altura existen gracias a la eficiencia de los sistemas de elevadores y no viceversa. En un contexto funcional el sistema de elevadores es la arteria principal del edificio.

Fue después que Elijah Graves Otis inventó el sistema de gobierno de velocidad para elevadores y el sistema seguro de frenado para elevadores en el año de 1857 [Bar03], que los sistemas de elevadores se convirtieron en una opción viable para transportar personal. Este fue un factor determinante para que la altura en las construcciones dejara de ser un factor limitante.

La primera construcción de gran altura que usaba el sistema de Otis fue instalada en la tienda Haughwout&Company en New York. Los sistemas de elevadores para este entonces funcionaban con bombas de agua presurizada y grandes motores, uno de estos sistemas fue presentado en la feria de exposición universal de París que debía mover la cabina del elevador sobre los 321 metros que constituyen la torre Eiffel.

Para el año de 1880 Werner von Siemens introdujo la utilización de fuentes eléctricas para los sistemas de elevadores. El desarrollo de la energía eléctrica le proporcionó un nuevo ímpetu en el uso de construcciones de gran altura.

A partir de entonces las construcciones eran cada vez más altas, y en países como Estados Unidos y Asia se marcaba una clara tendencia a preferir este tipo de edificaciones en ciudades con alta densidad poblacional. Un ejemplo de estas edificaciones son la torre Taipei 101 con una altura de 509 metros o la torre Burj Khalifa en Dubai con 828 metros de altura y 163 pisos, siendo hasta el momento la construcción habitable más alta del mundo [EMP12].

En rascacielos o edificaciones de gran altura los sistemas de control tradicional son ineficientes para cubrir la necesidad de transporte de pasajeros. Es por esto que grandes multinacionales constructoras de elevadores como por ejemplo MITSUBISHI y OTIS entre otras, gastan millones de dólares en investigaciones tendientes a solventar esta creciente necesidad, la investigación aislada sobre este campo es reducida y la información disponible de esta área es también escasa.

El presente trabajo de grado tiene como finalidad ofrecer un nuevo mecanismo de control para grupo de elevadores que mejore el rendimiento en el transporte de pasajeros en edificaciones de gran altura comparado con otros mecanismos de control convencionales. Se ofrece además un entorno de simulación de código abierto para el fenómeno estudiado; lo cual permite que la comunidad académica investigue sobre nuevos algoritmos de control para grupos de elevadores sin necesidad de tener que construir para este fin un simulador.

## 1.1. Definición del Problema

Se ha observado que el servicio prestado por los elevadores, en la mayoría de los casos es deficiente. Bajo condiciones de alto tráfico las personas tienen que esperar mucho tiempo para ser atendidas. En edificios pequeños no implican

mayores inconvenientes, sin embargo, en una construcción de gran altura, el transporte de los pasajeros debe hacerse de una manera ágil, eficiente y por qué no decirlo; de una manera inteligente, en donde se economice tanto el tiempo del pasajero, como la energía que usa el elevador.

Los sistemas de control tradicional son ineficientes para cubrir esta necesidad debido a que su diseño solo contempla reglas simples de control como la dirección en la que dirige el ascensor, o el número de pasajeros [MLdZCPSSdP96]. La creciente necesidad hizo que nuevas técnicas más complejas empezaran a ser aplicadas a este problema. A partir del desarrollo de la inteligencia artificial han ido apareciendo controladores basados en técnicas inteligentes que aumentan considerablemente la efectividad en la asignación de llamadas.

La mayoría de las técnicas usadas tienen arquitectura centralizada. Se propone replantear el problema desde la perspectiva distribuida en donde cada una de las cabinas compita por la llamada teniendo en cuenta el estado de las demás cabinas y el de sí misma.

Las cabinas actúan como agentes inteligentes que cooperan para atender eficientemente las llamadas de los usuarios. Existe además un agente intermediador, que resuelve los conflictos cuando hay varias cabinas compitiendo por la misma llamada. Este agente conciliador decide a favor de aquella cabina que tenga más posibilidad de atender la llamada de acuerdo a los objetivos de control.

## 1.2. Objetivos

El trabajo presentado es un aporte a la academia en el estudio del tráfico vertical, promueve además la investigación en esta área al ofrecer un simulador de código abierto. Los objetivos planteados para siguiente trabajo se enuncian a continuación.

### 1.2.1. Objetivo General

Diseñar un método distribuido de control para asignar de manera eficiente el tráfico de personas presente en una edificación, haciendo uso de técnicas de inteligencia artificial (I.A.).

### 1.2.2. Objetivos Específicos

1. Modelar matemáticamente el problema de tráfico presentado en las edificaciones de gran altura.
2. Diseño del método distribuido de control para la asignación de ascensores, haciendo uso de técnicas de control inteligente.
3. Evaluar la técnica de control desarrollada y comparar su eficiencia respecto a una técnica tradicional en un ambiente simulado.



## 2 Marco Teórico

En esta sección se hará una revisión de las técnicas de simulación existentes y cuales han sido utilizadas en el presente trabajo. Así mismo se realizará un recorrido por las técnicas de Inteligencia Artificial y su uso en el control para grupos de elevadores.

### 2.1. Controladores

A lo largo de la historia se han desarrollado diferentes métodos de control, entre los principales se encuentran:

#### 2.1.1. Controlador Basado en Lógica Difusa (CBLD)

El control difuso puede tratar las imposiciones de los sistemas para dar soluciones en condiciones más reales y menos ideales, además es posible mejorar aún más el rendimiento, optimizando los conjuntos difusos y la ponderación de las reglas.

#### 2.1.2. Controlador Basado en Optimización Robusta (CBOR)

En los modelos de programación matemática aplicados a fenómenos reales se suele suponer que los datos que intervienen son conocidos y constantes, lo que permite abordar su planteamiento y resolución. Sin embargo, esta hipótesis de constancia no suele ser cierta puesto que normalmente los datos pueden ser erróneos o incompletos [CANOSMJ], para lo cual la CBOR es muy buena opción ya que garantiza convergencia al óptimo, además de ello es tolerante a pequeñas variaciones en las condiciones iniciales de optimización, entre las desventajas se encuentra que la implementación computacional de este algoritmo es muy compleja y el tiempo de ejecución será muy pobre finalmente la eficiencia de la solución obtenida con este método es alta, más es costoso su tiempo de ejecución.

#### 2.1.3. Optimización Por Colonia De Hormigas (OCH)

Los algoritmos de optimización por hormigas son buenos para resolver problemas de optimización combinatoriales. Tienen gran velocidad de convergencia para encontrar la solución óptima. Consiste en un mecanismo control basado en el mejor camino -menos costo- que un enjambre de hormigas pueda encontrar. Los resultados de la simulación muestran que la eficiencia del controlador es mayor a los otros dos métodos presentados. La principal desventaja es que al ser tan elevado el tiempo de respuesta del algoritmo es difícil implementarlo en la realidad ya que la respuesta debería ser casi inmediata.

#### 2.1.4. Controlador Híbrido Para Grupo De Ascensores (CHGA)

Los sistemas de elevadores operan sobre un espacio altamente dimensional tanto en espacio continuo como discreto. El estado de este no es observable fácilmente, por lo tanto la solución de control no puede usar técnicas de optimización tradicionales. En esta subsección se presenta un método de control híbrido -Red Neuronal y PSO-. La convergencia a la solución óptima es lenta, sin embargo al usar una red neuronal de base radial se obtiene un mejor resultado. Tiene la ventaja que una vez entrenada la red neuronal el desempeño en producción irá a ser mejor.

### 2.1.5. Control Mediante aprendizaje reforzado (CMAF).

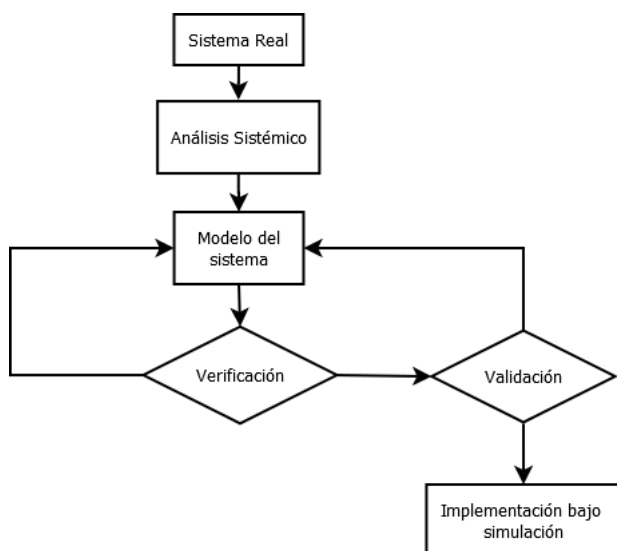
Inspirado por el comportamiento psicológico de los individuos el aprendizaje reforzado permite a una máquina aprender por medio de recompensas. Este método pertenece a los métodos no supervisados, por lo tanto no se hace necesario presentarle a la máquina la respuesta correcta.

## 2.2. Simulación

El proceso de simulación puede ser definido como la imitación de la operación en un proceso real o un sistema sobre el tiempo. [J00]

El proceso de simulación comprende tres elementos fundamentales: Sistema real, Modelo, Ordenador. Estos elementos están conectados como se aprecia en la siguiente figura 2.1. [J00]

Este modelo representa una versión simplificada del sistema real, permitiendo así, facilitar su estudio y análisis. Un edificio tiene características que varían en el tiempo, ejemplo de ellas son; la tasa de arribo de pasajeros por piso y el piso destino de las llamadas. Debido a estas características el sistema tiene un comportamiento no lineal. Durante el modelado del sistema a simular se llevan a cabo operaciones de verificación y validación del sistema, estas hacen parte del proceso iterativo para la simulación de un sistema real, según Banks [J00] como se muestra en la figura 2.1.



**Figura 2.1:** Proceso de simulación de BANKS

Pese a la gran variedad de modelos de simulación existentes todos estos se adaptan al siguiente esquema simplificado de Schmeiser, para este trabajo se usará esta simplificación .

1. Obtener observaciones básicas de una fuente de números aleatorios. En la simulación de este trabajo es necesario generar los usuarios del sistema y comportamientos dentro de el, esta generación estará basada en observaciones de la realidad identificada en otros trabajos académicos.
2. Transformar las observaciones básicas de entradas al modelo, según las especificaciones del mismo. Es necesario por lo tanto asignar a estos datos aleatorios un significado real dentro de la simulación, por ejemplo el momento de ingreso de un usuario al sistema según la variable temporal de la simulación, o el piso al que se dirige según el patrón de tráfico presente.
3. Transformar las entradas, a través del modelo, en salidas. Esto se logra simulando de acuerdo a los datos de entrada y cuantificando las salidas medidas del sistema.
4. Calcular estadísticas a partir de salidas, para estimar las medidas de comportamiento. Una vez corrida y finalizada la simulación es necesario medir estadísticamente el desempeño del sistema.

### 2.2.1. Técnicas de Simulación

De acuerdo a la naturaleza del sistema en estudio y los objetivos de la simulación se hace necesario categorizar la simulación. En la siguiente sección se explicaran las diferentes técnicas de simulación enunciando sus ventajas.

#### 2.2.1.1. Simulación de eventos discretos

El proceso de simulación de eventos discretos comprende; emular el flujo de un sistema a través del tiempo, donde las variables de interés son discretas, cada hilo del proceso general tiene asociado una línea de tiempo diferente, las cuales deben ser sincronizadas de alguna manera.

#### 2.2.1.2. Avance por Eventos

Esta técnica esta basada en el principio que el estado del sistema cambia cada vez que un evento ocurre. Durante el tiempo transcurrido entre un evento y otro el sistema permanece inalterado [PER09]. El sistema por lo tanto desliza el tiempo entre eventos, yendo de un evento a otro en el tiempo sin hacer pausas.

Los eventos deben ser enlazados de acuerdo al momento en el que se van a ejecutar. Para almacenar estos eventos se pueden usar estructuras como listas enlazadas, doblemente enlazadas. Las cuales deben mantener un orden cronológico de los eventos, es decir, si se genera un evento que ocurre en un tiempo que no es el último, la estructura debe mover los nodos de tal manera que no quede desordenada la lista.

#### 2.2.1.3. Avance por Unidad de Tiempo

Esta técnica mantiene un reloj interno del sistema que avanza un intervalo de tiempo definido en cada iteración. En cada avance de tiempo se valida si hay eventos que ocurran en ese preciso instante o y se ejecutan las tareas necesarias [PER09].

Esta técnica es usada principalmente en simulaciones de fenómenos físicos que ocurren durante un tiempo no muy largo, es decir en simulaciones que no tienden a infinito.

#### 2.2.1.4. Simulación Basada en Actividades

En una simulación de este tipo, el sistema modelado es una colección de actividades o procesos. Por ejemplo para un típico ejemplo de teoría de colas las actividades serían: a) Arribo del objeto b) Servicio del objeto c) Entrega del objeto atendido [PER09]. En estas simulaciones es importante conocer cuando la actividad empieza y cuando termina, además de controlar que ocurre después de cada actividad.

#### 2.2.1.5. Simulación Estocástica o Determinística

El sistema puede tener un comportamiento estocástico debido a que existen componentes aleatorios. Una de las variables aleatorias que podemos encontrar es la tasa de arribo en la cola de servicio, por lo general los sistemas a simular son estocásticos pero en algunas ocasiones, como en algunos sistemas físicos los fenómenos a simular son determinísticos, podríamos hablar de un circuito electrónico.

## 2.3. Simuladores de Tráfico Vertical

En el año de 1970 fue desarrollado el primer simulador de tráfico con el fin de verificar el comportamiento de los elevadores en la que era para ese entonces la edificación de mayor altura, el WORLD TRADE CENTER. Este simulador híbrido consistía en un componente análogo y otro digital, las tarjetas de control que se ubicaban en los pisos de la edificación se debían conectar al simulador digital. De esta manera todo el tráfico se debía ingresar por

medio de los botones reales que se ubican en los pisos de las edificación. Era un procedimiento tedioso ya que era necesario modelar todo el tráfico manualmente y la verificación del modelo simulado debía pasar por múltiples iteraciones que implicaban un gran trabajo manual [Bar03].

En el año de 1988 se desarrollo el primer simulador para PC, estos simuladores solo contemplaban un elevador y el algoritmo de control para la asignación de llamadas seguía unas reglas simples basadas en la posición del elevador y la ubicación de la llamada. Los algoritmos de control fueron avanzando en su complejidad y las compañías grandes ya podían verificar el funcionamiento en los avances sobre el control que iban teniendo. Los simuladores son desarrollados principalmente por y para las empresas fabricantes de sistemas de elevadores [OTI99][Sii04a]. Solamente Peters Research, empresa de investigación en planificación de edificaciones de gran altura cuenta con un simulador de licencia comercial [Res].

Los simuladores de tráfico vertical son útiles, no solamente para verificar algoritmos de control, estos también son usados para determinar el número de elevadores necesarios para servir en determinada edificación. Así mismo el simulador es útil para recrear situaciones de emergencia en un edificio y por ejemplo conocer el tiempo que tardaría una edificación en ser evacuada por medio de los elevadores. Son muchas más las aplicaciones que se le pueden dar al simulador al ser un componente fundamental de cualquier edificación.

### 2.3.1. Tráfico Vertical

Se entiende por tráfico en una edificación; el movimiento o tránsito de personas dentro del edificio, este tráfico tiene dos componentes tasa de arribo y probabilidad de destino, en donde:

**Tasa de Arribo:** Es el número de usuarios que llegan al sistema en determinado espacio de tiempo. La tasa de arribo en una edificación cambia de acuerdo a dos factores, uno es el tiempo en el que se mide y otro es el piso.

**Probabilidad Destino:** Es la probabilidad que tiene un pasajero de dirigirse del piso  $p_o$ , al piso  $p_d$ , en determinado instante de tiempo.

El tráfico que se presenta en una edificación tiene un comportamiento probabilístico que sigue un proceso de Poisson. Un ejemplo del tráfico en una edificación real se muestra en la siguiente imagen [L.97]. Este patrón pertenece a la Tour Europe en París, el trafico fue medido usando foto celdas en las puertas de los ascensores y el trafico resultante fue dividido en tres patrones de trafico

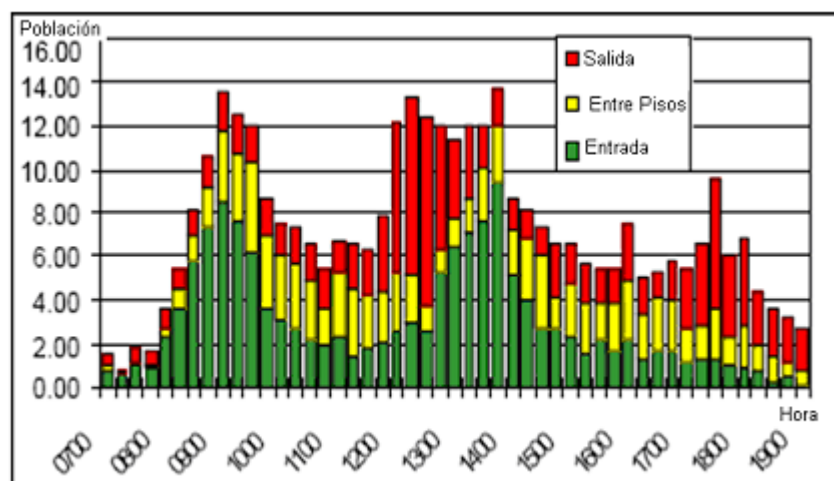


Figura 2.2: Patrón de tráfico [L.97]

Debido a que existen diferentes tipos de edificios como son: hospitales, edificios de oficinas, universidades, edificios residenciales, se debe tener en cuenta que no es igual el tráfico existente dentro de ellos. Por ejemplo, en un edificio residencial existe un tráfico recurrente entre el primer piso y otros pisos superiores, pero es casi nulo el tráfico entre pisos; caso contrario ocurre con un hospital en donde el tráfico entre pisos es más común.

Tradicionalmente se identifican tres patrones de tráfico, que ocurren durante el día [MLS01]:

- **Entrada** (incoming): se refiere al tramo horario coincidente con el acceso al edificio, y por tanto se producen viajes de subida desde la planta baja.
- **Bajada** (outgoing): se refiere al tramo horario coincidente con el salida del edificio, y por tanto se producen viajes de bajada desde las diferentes plantas a los pisos más bajos.
- **Entre pisos** (interfloor): se refiere al resto de tramos horarios donde existe la probabilidad de viajes entre plantas (este patrón sólo se produciría en edificios destinados a uso profesional y en ese tramo horario específico).

### 2.3.2. Determinación y Predicción de Tráfico

La determinación de los patrones de tráfico resulta un problema complejo. Para estimar el flujo de personas se ha usado la observación directa y datos procedentes de macro-encuestas realizadas por centros de investigación. Centros que sirven este tipo de información son el CIBSE (The Chartered Institution of Building Services Engineers) y el BRE (Building Research Establishment).

A parte del método por observación directa aparece el “SP Inverso”. Este estima el número de pasajeros que usan el ascensor basándose en el número de llamadas y en los movimientos del mismo, tiene comprobada efectividad cuando el patrón de tráfico es de subida y de bajada, pero para el tráfico entre pisos no es muy acertado. Otro método es “Estimación del flujo de tráfico completo de Peters” [Pet00], que obtiene información de tráfico haciendo uso de métodos estadísticos, mediante el establecimiento de los intervalos de tiempo en los que el tráfico es más intenso.

La inteligencia artificial también ha sido usado en la predicción y determinación de tráfico. Se encuentra el Modelo de reconocimiento del patrón de tráfico mediante reglas de lógica difusa [L.97], el cual se basa en 8 conjuntos difusos que representan 8 patrones de tráfico diferentes.

Las redes neuronales también has sido usadas para esta tarea, está el modelo de predicción mediante redes neuronales [Imr00]. Este trata de acoplar una red neuronal de predicción de tráfico en el sistema de control de un grupo de ascensores para mejorar la actuación del controlador del grupo. De esta manera la red neuronal proporciona un mecanismo de aprendizaje dinámico del comportamiento del edificio y realiza la predicción de futuros eventos basándose en lo que ha aprendido a lo largo del tiempo.

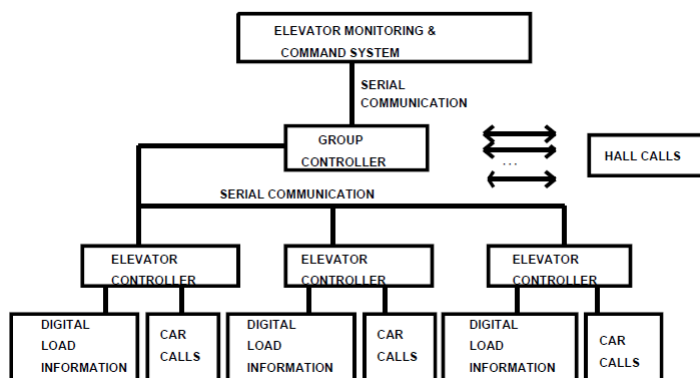
El estudio en la determinación de tráfico sigue avanzando, existen hoy soluciones RFID, radares de personas y visión por computador como nuevas tecnologías que apoyan esta importante tarea.

## 2.4. Controladores de Grupo de Elevadores

La investigación de nuevos modelos de control es poco tratada en nuestro país ya que no contamos con rascacielos, los cuales si abundan en Japón, China o Dubai. Las técnicas de control no-tradicionales para asignar las llamadas de un grupo de elevadores, empezaron a aparecer en los años 90 y fueron desarrolladas por empresas privadas que contaban con la colaboración de centros de investigación y universidades[MR88, Tha89].

La colaboración universidad-empresas para esta materia ha sido muy activa. En España por ejemplo se realiza investigación orientada al mejor funcionamiento de estos sistemas mancomunadamente entre la Universidad de Sevilla y MAC PUAR S.A. [LJ01]. Otro ejemplo está en Berlín, el centro académico el Konrad-Zuse-Zentrumfür Information stechnik de Berlin colabora con la multinacional del transporte vertical Schindler [HD99] o el Systems Analysis Laboratory de la Universidad Tecnológica de Helsinki con KONE Corporation [L.98].

La arquitectura típica de un sistema de control para grupo de elevadores se presenta en la Figura No. 2.4. El controlador de grupo de elevadores es el cerebro del sistema, este sistema asigna las llamadas a cada controlador de elevador optimizando la función de costo. El controlador de elevador existe para cada uno de los elevadores del grupo, este solo tiene la responsabilidad de almacenar las llamadas hechas por los usuarios y mover el elevador dentro de sistema. Los controladores de elevador no están en comunicación unos con otros, estos son coordinados por el controlador de grupo [Bar03].



**Figura 2.3:** EGCS Arquitectura Típica

Actualmente los controladores de grupo de ascensores cuentan con más información que la que se tenía antes. En las nuevas edificaciones se colocan matrices de botones que sirven para que el pasajero introduzca el piso hacia donde se dirige [Sii04a], por esta razón ya no es necesario introducir botones de destino dentro de la cabina del elevador.



**Figura 2.4:** Matriz de botones para registro de llamadas de elevador

### 2.4.1. Criterios de Optimización en el Transporte Vertical

El problema de asignación de elevadores para atender las llamadas se puede ver como un problema de optimización. El objetivo del controlador es asignar las llamadas a los ascensores que tienen mayores posibilidades de atenderla eficientemente. El problema en si es una combinación de programación no lineal en tiempo real, distribución de recursos y control estocástico [HMHL04].

Como ya se ha dicho el controlador de grupo busca asignar las llamadas a los elevadores optimizando la función de costo. La optimización más usual es minimizar el tiempo de espera de los pasajeros. Se ha encontrado también que optimizando el tiempo de viaje de los pasajeros, se reduce el número de paradas del elevador. Lo cual hace que los elevadores viajen con más carga dentro de sí.

Es común que los controladores para grupo de ascensor manejen los mismos criterios de optimización, los cuales recopilando todos los criterios vistos se pueden dividir en dos grupos: funcionamiento del sistema y servicio ofrecido al usuario, los cuales se explican a continuación

#### 2.4.1.1. Funcionamiento del Sistema

- Consumo energético del sistema: El cual se debe minimizar haciendo que el ascensor pare lo menos posible y evite los desplazamientos innecesarios.

- Capacidad del grupo de ascensores (volumen de viajeros transportados): También se le conoce como carga, entre más persona se logre llevar en la misma cabina mucho mejor.

### 2.4.1.2. Servicio ofrecido al usuario

- Tiempo De Espera: Promedio del tiempo de espera de los pasajeros para ser atendidos. Representa el tiempo que un elevador necesita para viajar desde su posición actual hasta el piso en el que se genera la llamada. El objetivo es llevar este tiempo al mínimo.
- Tiempo de viaje: Tiempo que el pasajero dura dentro del ascensor hasta que llegue al piso objetivo. El objetivo es minimizar este tiempo.
- Tiempo de esperas muy largos: Minimizar el porcentaje de largas esperas por la llegada de un ascensor, es conocido que psicológicamente las personas pierden la paciencia pasados 3 minutos sin ser atendidas [MLdZCPSSdP96].

### 2.4.2. Técnicas De Control

La asignación de llamadas en una edificación de gran altura requiere de técnicas modernas de control que basándose en el estado del sistema tome la mejor decisión tendiente a minimizar la función de costo. La asignación de llamadas a los ascensores ocupa gran parte del trabajo de compañías como MITSUBISHI, KONE, SCHINDLER. El control de este tipo de sistemas no es sencillo, presenta un comportamiento dinámico, variante en el tiempo. Los factores que dificultan el control, entre otros son:

- Falta de certeza en los parámetros que definen el problema, muchas veces estos son tomados de un predictor.
- Combinación muy alta de posibilidades en el espacio de búsqueda, lo que lo hace muchas veces intratable computacionalmente.
- Variables estacionales en los patrones de tráfico con cierta incertidumbre.

Las técnicas más usadas para tratar con este tipo de problema se pueden agrupar de la siguiente manera.

- Técnicas tradicionales [R.71][MLdZCPSSdP96]:
  - Maniobra Universal Por Pulsadores.
  - Maniobra Duplex.
  - Maniobra Colectiva selectiva en los dos sentidos.
- Técnicas no tradicionales:
  - Lógica difusa [TKK96]
  - Optimización robusta [LD]
  - Optimización por colonia de hormigas [ZJl]
  - Optimización Híbrida. [JLZ10]
  - Aprendizaje reforzado. [Cri98]
  - Algoritmos genéticos.
  - Redes neuronales. [Imr00]
  - Optimización por enjambres. [Bra00]

### 2.4.2.1. Métodos De Control Tradicionales

El diseño de controladores convencionales en el campo de tráfico de pasajeros en edificaciones está orientado por reglas de tráfico fijas en las cuales no se tiene en cuenta la optimización del servicio. Para el control de tráfico vertical, nos enfrentamos con diferentes situaciones, que implican parámetros de operación cambiantes, al experimentar patrones de tráfico diferentes y fluctuaciones en el transcurrir normal de los mismos.

Las reglas por las que se guían los controladores convencionales se numeran a continuación. [R.71]

1. El elevador no llevara a un pasajero dentro del ascensor en la dirección contraria a la que se dirige.
2. La capacidad de cada ascensor son  $k$  personas, y si el cupo esta lleno no atenderá llamadas.
3. Un elevador viaja a una velocidad constante de  $n$  pisos por segundo.
4. Atender cada piso toma  $i$  segundos. Durante este tiempo la persona entrara o saldrá del ascensor.
5. Si el número de personas es mayor que  $v$  se necesitaran de  $w$  segundos.
6. Un ascensor no ignorará alguna llamada, a no ser que este ejecutando una de las restricciones anteriormente mencionadas.

A continuación se describen brevemente los métodos básicos de control más empleados.

**Maniobra Universal Por Pulsadores** Cuando el ascensor esta desocupado, y es el primero en recibir la orden irá a atender la llamada. Si durante el funcionamiento se solicita el ascensor desde cualquier otro piso la llamada será ignorada y el carro seguirá obedeciendo la orden que ha iniciado la llamada. [MLdZCPSSdP96]

**Maniobra Duplex** Cualquier llamada es atendida por el elevador que se encuentre libre; pero si están libres dos elevadores, acudirá a la llamada el que esté mas próximo al piso origen del llamado. Solamente acude un elevador a cualquier llamado. [MLdZCPSSdP96]

**Maniobra Colectiva selectiva en los dos sentidos** El elevador registra únicamente los llamados que se generen en el sentido que va el ascensor. Es decir si el ascensor va hacia arriba solo se registrarán los llamados que se hagan en los pisos superiores, y si va hacia abajo solo registrará los que se generen en pisos inferiores. El sentido se invierte cuando llegue el elevador al último piso, ya sea por una llamada de piso o una llamada de ascensor. [MLdZCPSSdP96]

## 2.5. Sistemas Multi Agente

Un agente es un componente de software que tiene autonomía y flexibilidad en su funcionamiento sobre un medio ambiente en particular. Este medio ambiente por lo general está habitado por otros agentes [WJ95]. En un sistema multi agente (MAS), cada agente actúa individualmente o en cooperación con otros agentes para conseguir los objetivos trazados.

Un sistema multiagente se puede ver como una red de resolvedores de problemas débilmente acoplados que trabajan juntos para resolver problemas que están más allá de las capacidades individuales o conocimiento de cualquiera de ellos [NRJW98].

Flexible en el contexto MAS significa, que el agente es:

- **Reactivo**, reacciona al entorno en el cual se encuentra.
- **Pro-activo**, es capaz de cumplir su propio plan, tienen un carácter emprendedor.
- **Social**, es capaz de comunicarse con otros agentes a través de algún lenguaje común.
- **Racionalidad**, un agente puede razonar acerca de datos percibidos a fin de calcular una solución óptima.



- **Adaptabilidad**, esta característica está relacionada con el aprendizaje que un agente puede lograr y con su capacidad para cambiar su propio comportamiento basado en este aprendizaje.
- **Movilidad**, es la capacidad de un agente para moverse a través de una red.
- **Veracidad**, un agente no puede comunicar información falsa de manera deliberada.
- **Benevolencia**, un agente está dispuesto a ayudar a otros agentes si esto no está en contra de sus propios objetivos.

### Conceptos Básicos

- **Agente**, un agente es un sistema computacional autónomo que ejecuta acciones con el fin de cumplir sus objetivos. Está inmerso en un ambiente dado, del cual obtiene información mediante y al cual puede modificar mediante sus acciones [Wei99].
- **Sistema Multiagente**, se define como una colección de agentes racionales y autónomos, insertos en un ambiente en común, capaces de coordinar su conocimiento, objetivos, habilidades y estrategias a fin de resolver un cierto problema[Wei99].
- **Pro actividad**, es la capacidad de tomar la iniciativa para realizar las acciones necesarias para cumplir con los objetivos para los que son diseñados[WJ95].
- **Capacidad de reacción**: es la capacidad de responder a los estímulos del ambiente con las respuestas adecuadas y en el tiempo adecuado, de forma activa[WJ95].
- **Habilidades sociales**: es la habilidad de interactuar con otros agentes, inclusive humanos cuando es necesario para cumplir con sus objetivos. Las dos habilidades básicas son las habilidades de cooperación y de negociación[WJ95].

## 2.6. Lógica Difusa

**INTRODUCCIÓN** La mayoría de los fenómenos que encontramos cada día son imprecisos, es decir, tienen implícito un cierto grado de difusidad en la descripción de su naturaleza. Esta imprecisión puede estar asociada con su forma, posición, momento, color, textura, o incluso en la semántica que describe lo que son.

En muchos casos el mismo concepto puede tener diferentes grados de imprecisión en diferentes contextos o tiempo. Un día cálido en invierno no es exactamente lo mismo que un día cálido en primavera. La definición exacta de cuando la temperatura va de templada a caliente es imprecisa -no podemos identificar un punto simple de templado, así que emigramos a un simple grado, la temperatura es ahora considerada caliente. Este tipo de imprecisión o difusidad asociado continuamente a los fenómenos es común en todos los campos de estudio: sociología, física, biología, finanzas, ingeniería, oceanografía, psicología, etc [Cal03].

La idea de una lógica multi-valuada ha estado presente desde principios del siglo XX. Charles Sanders Pierce (1839-1914) fue uno de los primeros pensadores que se interesaron en la vaguedad o incertidumbre, él no creía en la separación entre verdad y falsedad y postuló que la incertidumbre era un grado entre estos dos estados. Pero fue Lukasiewicz, quien dio el primer paso hacia la definición formal de la incertidumbre, al introducir en 1920 la idea de una lógica tri-valuada basada en verdadero, posible y falso.

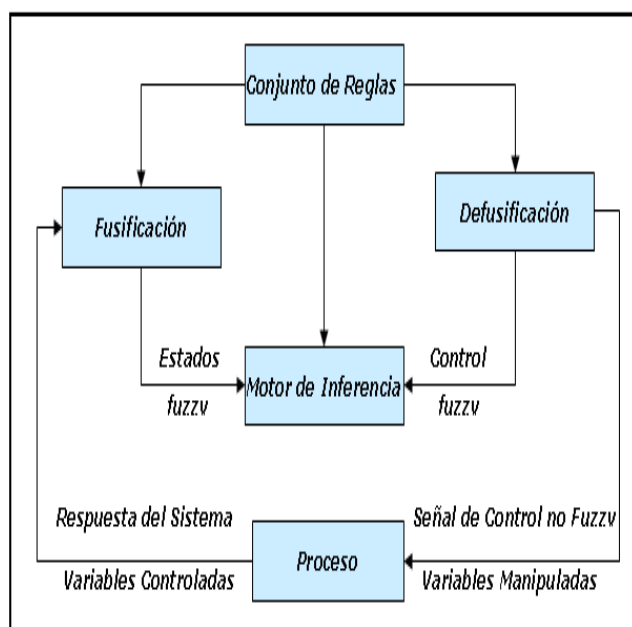
En 1965, Lotfi Zadeh, profesor de la Universidad de California en Berkley, presentó una publicación en donde formalmente definía la teoría de conjuntos difusos a partir de la cual derivó la lógica difusa. Zadeh extendió la clasificación lógico-Aristotélica del "Todo o Nada", con una lógica que permite grados entre verdad y falsedad. Esta generalización de la lógica clásica, hace que la pertenencia de un objeto a un conjunto no se restrinja a 0 o 1, sino que pueda tomar valores intermedios, permitiendo que los valores de verdad de una proposición sean un número que pertenece al intervalo  $[0, 1]$ , esta generalización hace posible realizar razonamiento aproximado. Permitiendo acercar la matemática al lenguaje impreciso del hombre, que contiene términos vagos como “mucho”, “poco”, “tibio”, etc. Usualmente estos términos no tienen cabida en la lógica y la matemática convencional [Dri96].

**Estructura Básica De Un Controlador Difuso** Un controlador basado en lógica difusa realiza tres acciones básicas. La primera, corresponde al procedimiento denominado fusificar, que implica el asignar un valor lingüístico a una variable utilizando funciones de membresía. La fusificación convierte el valor real de una variable de entrada a un valor difuso, que podrá ser manipulado en el bloque de base de reglas de inferencia.

La segunda, corresponde a la inferencia lógica que consiste en definir las reglas del tipo Si - Entonces para evaluar las variables lingüísticas. La base de reglas almacena el conocimiento en forma de un conjunto de reglas, que contienen el conocimiento heurístico y cualitativo en el que se basarán las acciones de control. El mecanismo de inferencia, se encarga de evaluar las reglas e infiere una conclusión que se convertirá en la acción de control que se pasará a través del módulo de defusificación.

La tercera, se denomina defusificar, que consiste en normalizar un valor difuso a su equivalente en salida de control nítida. El proceso de defusificación, convierte la variable difusa que se obtuvo como salida en el bloque del mecanismo de inferencia, a un valor real. Este valor real o nítido será la acción de control que se aplicará al proceso de asignación de elevadores en el controlador propuesto.

Básicamente, se debe ver el control difuso como un tomador de decisiones artificial que opera en un sistema de lazo cerrado en tiempo real. La siguiente figura muestra los componentes principales de un controlador difuso, a saber: interfaz de fusificación, base de conocimiento, motor de inferencia e interfaz de defusificación [Dri96].



**Figura 2.5:** Proceso de un controlador difuso

## 2.7. Redes Neuronales Artificiales

En el cerebro humano hay aproximadamente cien mil millones de neuronas ( $10^{11}$  células nerviosas), cada célula conectada con sus vecinos por medio de conexiones sinápticas, se estima que en un cerebro adulto hay  $10^{14}$  sinápsis. Las señales se propagan entre neuronas mediante una reacción electroquímica: a nivel de la sinapsis, la neurona que genera la señal emite unos neurotransmisores que activan los receptores de la neurona que recibe la señal.

En 1943, McCulloch y Pitts propusieron un modelo matemático sencillo del funcionamiento de las neuronas: la neurona dispara un potencial de acción cuando la combinación lineal de sus entradas supera un umbral, este tipo de redes se conocen bajo el nombre de perceptron.

## Función Discriminantes Lineal

Consideremos el problema de clasificar un conjunto de datos  $X \subset R^d$  en dos clases (X es simplemente un conjunto de puntos en  $R^d$ ).

Se llama función discriminante a una función  $y : X \rightarrow R$  tal que  $x \in X$ , se asigna a la clase  $C_1$  si  $y(x) > 0$  y a la clase  $C_2$  si  $y(x) < 0$ .

La definición más común que toma la función discriminante es

$$y(x) = \sum_{i=1}^d w_i x_i + w_0 = w^T x + w_0$$

El vector  $w$  de dimensión  $d$  se llama vector de pesos, el parámetro  $w_0$  (que cumple  $w_0 < 0$ ) se llama el sesgo (bias), o umbral (threshold), en referencia al modelo biológico de McCulloch y Pitts: cuando la suma ponderada de las señales que recibe la neurona supera el umbral, se dispara una señal por el axón de la neurona [Rao95].

**Aprendizaje** Partiendo de un conjunto de pesos sinápticos aleatorio, el proceso de aprendizaje busca un conjunto de pesos que permitan a la red mapear correctamente un vector de entrada a un vector de salida. Durante el proceso de aprendizaje se va refinando iterativamente la solución hasta alcanzar el nivel de exactitud deseado. Los diferentes tipos de aprendizaje se numeran a continuación.

- **Aprendizaje supervisado.** Se presenta a la red un conjunto de patrones de entrada junto con la salida esperada. Los pesos se van modificando de manera proporcional al error que se produce entre la salida real de la red y la salida esperada.
- **Aprendizaje no supervisado.** Se presenta a la red un conjunto de patrones de entrada. No hay información disponible sobre la salida esperada. El proceso de entrenamiento en este caso deberá ajustar sus pesos en base a la correlación existente entre los datos de entrada.
- **Aprendizaje por refuerzo.** Este tipo de aprendizaje se ubica entre medio de los dos anteriores. Se le presenta a la red un conjunto de patrones de entrada y se le indica a la red si la salida obtenida es o no correcta. Sin embargo, no se le proporciona el valor de la salida esperada. Este tipo de aprendizaje es muy útil en aquellos casos en que se desconoce cual es la salida exacta que debe proporcionar la red.

### Operación

Una vez finalizada la fase de aprendizaje, la red puede ser utilizada para realizar la tarea para la que fue entrenada. Una de las principales ventajas que posee este modelo es que la red aprende la relación existente entre los datos, adquiriendo la capacidad de generalizar conceptos. De esta manera, una red neuronal puede tratar con información que no le fue presentada durante de la fase de entrenamiento.



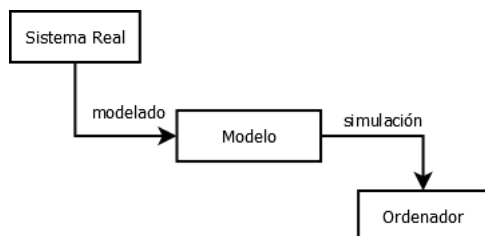
### 3 Simulador de Edificación

Validar el desempeño del controlador y su eficiencia respecto a las técnicas tradicionales requiere manipular las condiciones del sistema y efectuar un gran número de pruebas. Realizar estas pruebas en una edificación real sería bastante complicado y costoso. Las grandes compañías cuentan con simuladores propios y por obvios motivos no son compartidos para fines académicos, ejemplo de estos simuladores son el Building Traffic Simulator, de la empresa finlandesa KONE [MLS01]. Otros más lo tienen OTIS, SCHINDLER, MITSUBISHI.

Debido a la necesidad de mejorar la eficiencia en el transporte de personas sobre edificaciones de gran altura, compañías líderes en ésta área han desarrollado diversas técnicas de control [HH08, Sii04b] invirtiendo recursos financieros para investigación. Sus avances y nuevos algoritmos de control para grupo de elevadores son verificados en simuladores contruidos *ad-hoc* que reproducen con precisión el tráfico de pasajeros y que miden con exactitud los tiempos invertidos por los usuarios para movilizarse dentro de la edificación. Algunos de estos ambientes de simulación son OtisPlan de Otis Corporation [OTI99], Building Traffic Simulator (BTS) de la empresa finlandesa KONE [Sii04a], Elevate desarrollado por Peter Research ltd.

Estas herramientas de simulación sofisticadas tienen en común que son propietarias, en el caso de BTS y OtisPlan su uso está restringido a personal de la compañía únicamente y para el caso de Elevate existe una licencia comercial de usuario único con un costo de 2900 dolares [Res].

Para evitar la construcción del simulador se buscó en la comunidad académica opciones libres, pero no se encontró ningún ambiente de simulación. Por consiguiente, se debió construir un simulador sencillo siguiendo el flujo descrito por Banks [BANKS2000] en el que partiendo de un sistema real se llega a un modelo por computador.



**Figura 3.1:** Modelo simulación, flujo Banks [BANKS2000]

#### 3.1. Diseño de la Simulación

El simulador a desarrollar permitió tener un ambiente controlado que representó las características más importantes de una edificación y simplificó su representación, facilitando así, el mantenimiento, adaptación y reutilización

- El objetivo general de la simulación es simular una edificación real en la cual el estudio de tráfico se haya hecho previamente y el número de ascensores sea suficiente para servir correctamente a los usuarios.
  - Se busca medir el desempeño de diferentes estrategias de control para grupo de elevadores.
  - Se desea medir el tiempo que toma una evacuación por medio de los elevadores. Esto depende de la naturaleza de la emergencia [COU11].
  - Se debe poder determinar si la configuración del sistema de ascensores es suficiente para servir la población del edificio.
  - Se desean simular situaciones de emergencia, como por ejemplo que un elevador quede fuera de servicio.

### 3.1.1. Análisis Sistémico

Un sistema puede verse como un objeto en el cual interactúan variables de diferentes clases para producir señales observables denominadas; salidas. Las señales externas también pueden afectar e influir en el comportamiento del sistema, pero estas señales son susceptibles de manipulación. El sistema además, puede presentar perturbaciones que pueden ser clasificadas en observaciones mensurables y aquellas que solamente pueden observarse. Todas estas señales son fundamentales para poder determinar el modelo de un sistema.

Para el desarrollo del presente estudio, se ha identificado el sistema edificio, éste constituye un ejemplo de los sistemas abiertos. Así mismo, se ha identificado el subsistema elevador. Un sistema abierto “puede considerarse como un conjunto de partes en constante interacción constituyendo un todo sinérgico orientado hacia determinados propósitos y en permanente relación de interdependencia con el ambiente externo” [DRI00].

### 3.1.2. Componentes del Sistema

Del análisis sistémico realizado se encontraron estos como componentes principales:

- **Edificio:** Espacio dentro del cual se movilizan personas u objetos, es el ente contenedor de los elevadores del sistema.
- **Ascensor:** Es el objeto que se encarga de recorrer el edificio transportando a las personas entre sus diferentes pisos.
- **Piso(s):** Objeto componente del edificio, a través de los cuales se desplaza el elevador transportando a las personas.
- **Pasajero:** Es el objeto a transportar entre las diferentes plantas o pisos de la edificación, presenta un comportamiento aleatorio en cuanto a la tasa de arribo.

### 3.1.3. Consideraciones de Diseño

Antes de diseñar el sistema se deben considerar algunas reglas básicas que condicionaran el diseño del simulador:

- Las llamadas generadas en los pisos son hechas a través de una matriz de botones, esto permite que el sistema conozca con anterioridad el piso destino de cada pasajero antes de ser embarcado [Sii04b].
- Una vez las llamadas son asignadas no pueden ser reasignadas.
- Una vez el ascensor sirva todas sus llamadas y quede libre, regresara a su piso reposo.
- Los pasajeros que arriban al sistema, siguen un proceso de Poisson, sobre esto se detallará más adelante.
- La política del asignación de llamadas del sistema es de tipo colas FIFO, primera llamada que entra al sistema, primera llamada en ser atendida.

### 3.1.4. Técnica de Simulación Escogida

Al tener eventos con separación entre ellos corta, el tiempo de ocio de sistema es bajo. Esto hace que el mejor método de simulación para este caso sea el diseño basado en “Avance por Unidad de Tiempo” con comportamiento estocástico [Kel00].

Se puede entender mejor la razón por la cual se escoge esta técnica de “avance por unidad de tiempo” si se piensa que los eventos generados durante la simulación de una edificación ocurren con una altísima frecuencia. Los eventos que más se repiten son por ejemplo “mover cabina”, “abrir puerta de cabina”, “cerrar puerta”, “recoger pasajero”, “despachar pasajero”, etc.

Si se usara por ejemplo una técnica de basada en “avance por eventos”, sería necesario manejar una lista doblemente enlazada de eventos e ir introduciendo entre dos eventos ya almacenados uno nuevo que genere alguna de las rutinas del simulador. Éste proceso es costoso computacionalmente además de frecuente.

La escogencia de la técnica de simulación estocástica y no determinística responde a la naturaleza misma del problema. Ya que la generación de pasajeros, no se puede llevar a cabo de manera determinística, si no que debe basarse en una función de probabilidad que modele éste tipo de problemas de tráfico.

### 3.1.5. Proceso General De La Simulación

La simulación como metodología de análisis de sistemas está basada en la construcción de un modelo que describe el comportamiento del sistema [DRI00], en este caso implementado en un ordenador.

Pese a la gran variedad de modelos de simulación existentes todos estos se adaptan al siguiente esquema simplificado de Schmeiser, para este trabajo se usará esta simplificación .

1. Obtener observaciones básicas de una fuente de números aleatorios. En la simulación de este trabajo es necesario generar los usuarios del sistema y comportamientos dentro de el, esta generación estará basada en observaciones de la realidad identificada en otros trabajos académicos.
2. Transformar las observaciones básicas de entradas al modelo, según las especificaciones del mismo. Es necesario por lo tanto asignar a estos datos aleatorios un significado real dentro de la simulación, por ejemplo el momento de ingreso de un usuario al sistema según la variable temporal de la simulación, o el piso al que se dirige según el patrón de tráfico presente.
3. Trasformar las entradas, a través del modelo, en salidas. Esto se logra simulando de acuerdo a los datos de entrada y cuantificando las salidas medidas del sistema.
4. Calcular estadísticas a partir de salidas, para estimar las medidas de comportamiento. Una vez corrida y finalizada la simulación es necesario medir estadísticamente el desempeño del sistema.

### 3.1.6. Variables de Simulación

El modelo de la realidad, en nuestro caso el edificio, es una representación del sistema, sus componentes y la dinámica que este supone. Este modelo puede tomar la forma de cualquier sistema real si se tienen en cuenta las características comunes al sistema. Las características identificadas pasan a ser parte del modelo computacional, el cual puede ser manipulado según la necesidad de simulación. En la siguiente sección se presentan las características del modelo identificadas, categorizadas según su naturaleza dinámica y los componentes a las que pertenece.

#### 3.1.6.1. Variables Independientes

##### Simulación

- **Cronómetro de la simulación** ( $t$ ): Tiempo actual de la simulación.

##### Edificio

- **Número de pisos** ( $f$ ): Número de pisos de la edificación a simular.
- **Pisos portal** ( $g_i = 1$  si es portal, 0 en otro caso. Para todo  $i \in 0 \leq i \leq f$ ): Pisos por los cuales están entrando nuevos usuarios al sistema.
- **Pisos reposo de ascensor** ( $r_j$ . Para todo  $j \in 0 \leq j \leq e$ ): Pisos a donde va cada ascensor  $e$  una vez que no tenga llamadas de servicio.
- **Distancia entre pisos** ( $d_f$ ): Distancia que hay entre 2 pisos adyacentes.
- **Población en cada piso** ( $P_i$ , en dónde  $i \in [0, f]$ ): Población que alberga cada piso.

### Sistema de Ascensores

- **Número de elevadores** ( $e$ ): Número de ascensores con los que se correrá la simulación.
- **Capacidad del elevador** ( $CC_i$ , para todo  $i \in [0, e]$ ): Cantidad máxima de pasajeros para el ascensor  $i$ .
- **Aceleración del elevador** ( $A_i$ , para todo  $i \in [0, e]$ ): Aceleración de cada elevador.
- **Velocidad del ascensor** ( $v_i$ , para todo  $i \in [0, e]$ ): Velocidad promedio con la que el ascensor  $i$  recorre el edificio, medida en metros por segundo.
- **Tiempo de viaje entre dos pisos adyacentes** ( $t_{fi}$ , para todo  $i \in [0, e]$ ): Tiempo que tarda un ascensor en llegar de un piso a otro adyacente cuando tiene que parar.
- **Tiempo cierre puerta ascensor** ( $c_i$ , para todo  $i \in [0, e]$ ): Tiempo medido en segundos que dura la puerta del ascensor  $i$  en cerrarse.
- **Tiempo apertura puerta ascensor** ( $o_i$ , para todo  $i \in [0, e]$ ): Tiempo medido en segundos que dura la puerta del ascensor  $i$  en abrirse.
- **Tiempo de transferencia por pasajero** ( $t_p$ ): Tiempo que dura un pasajero en entrar o salir del ascensor.

**Dinámica de la Cabina de Elevador** Idealmente los valores de frenado y arranque de la cabina del elevador se toma siguiendo el diagrama de velocidad de expuesto en [SMBB06], esto facilita la implementación de la simulación. Para poder modelar esta dinámica se hace necesario involucrar las variables: distancia entre pisos  $h$ , aceleración máxima y velocidad máxima.

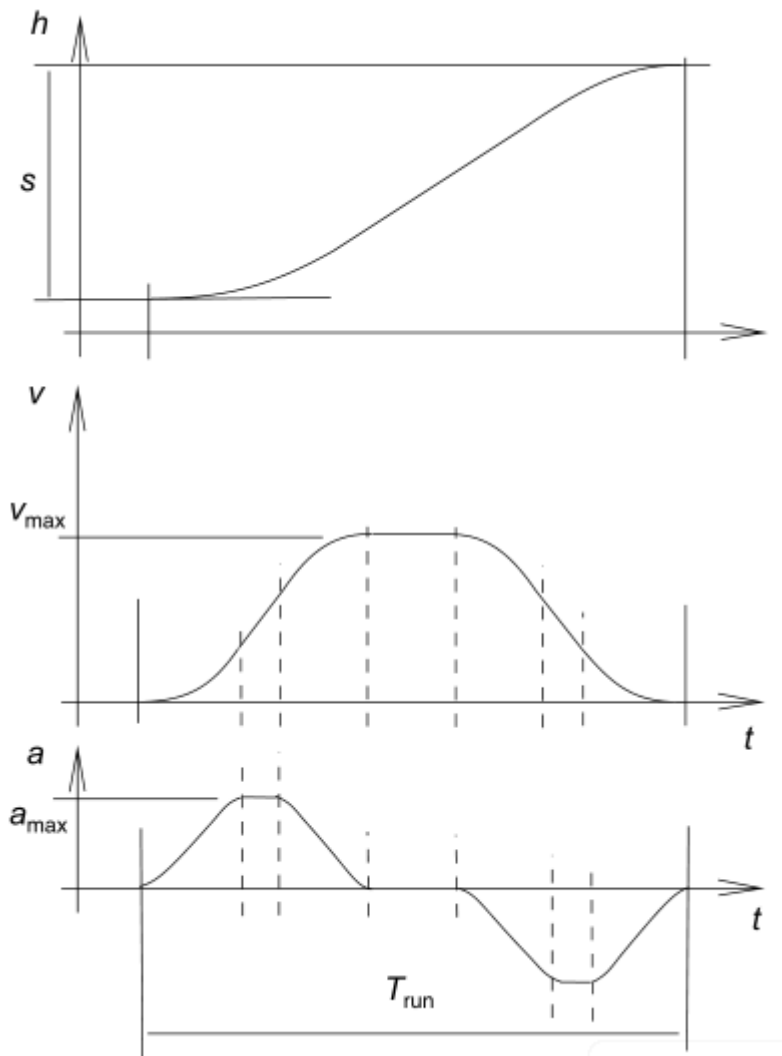
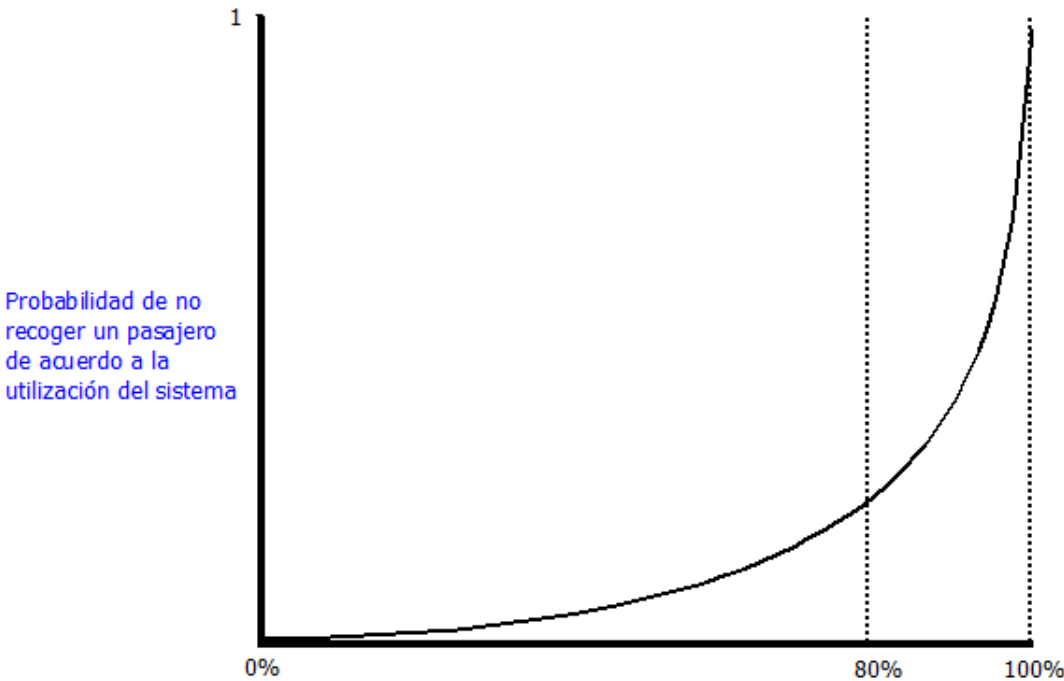


Figura 3.2: Dinámica del ascensor



### 3.1.6.2. Variables Dependientes

- **Densidad de arribo** ( $\lambda(t)$ ): Número de personas esperadas por unidad de tiempo, sigue un proceso de Poisson [SMBB06].
- **Tasa de servicio** ( $\mu(t)$ ): Número de personas que pueden ser servidas por unidad de tiempo, sigue un proceso de Poisson [SMBB06].
- **Tasa de utilización** ( $\rho(t) = \frac{\lambda(t)}{\mu(t)}$ ): Tasa que muestra el estado de utilización del sistema, se desea que este vamos sea  $\rho < 1$  [SMBB06].
- **Población de pasajeros del sistema** ( $P = 0,8CC$ ) : Promedio de de pasajeros cargados en cada viaje del sistema. Para evitar que queden pasajeros sin atender en la cola del sistema se asume que el factor de utilización es menor que el 100 % de la capacidad del sistema[Bar03], aunque en algunos sistemas lo pasajero son encolados en los sistemas de grupos de ascensor esto no se considera. Generalmente se toma un valor del 80 % como promedio de utilización de la capacidad del sistema, esto se puede ver en la gráfica.
- **Tiempo de transito entre dos pisos adyacentes** ( $t_{ti} = \frac{d_{fi}}{v_i}$ , para todo  $i \in [0, e]$ ): Tiempo que tarda un ascensor en pasar por un piso adyacente cuando NO tiene que parar.



**Figura 3.3:** Probabilidad de no recoger un pasajero

- **Tiempo de viaje del pasajero** ( $TT_i$ , para todo  $i \in P$ ) : Tiempo que dura un pasajero desde que toma el ascensor hasta que llega al piso destino.
  - $TT_i = 2H \frac{d_f}{v_i} + (S + 1)(c_i + o_i + t_{fi} - t_{ti}) + 2Pt_p$ , en donde:
    - P : Cantidad de pasajeros en la cabina.
    - S : Promedio de paradas que hace el ascensor en el viaje completo.
    - H : Promedio del piso más alto alcanzado.
- **Tiempo de transferencia de pasajeros** ( $C(i, j)$ , en donde  $i$  es el número de pasajeros que entran al ascensor y  $j$  los que salen. La constante de entrada KI y salida de pasajeros KO) : Tiempo que dura la entrada y salida de pasajeros viene dado por la formula.
  - $C(i, j) = \sum_i KI + \sum_i KO$

## Pasajero

- **Número de pasajeros que arriban en un tiempo  $t$  ( $N(t)$ ):** Número de pasajeros que arriban a la edificación en el tiempo  $t$ . Depende de la población en el edificio.
- **Número de pasajeros viajando en el tiempo  $t$  ( $Q(t)$ ):** Total de personas que están dentro de alguna cabina y no han llegado a su piso destino. Depende de la población en el edificio.
- **Número de pasajeros sin atender en el tiempo  $t$  ( $P(t)$ ):** Número de personas que esperan ascensor en el pasillo. Depende de la población en el edificio.
- **Número de pasajeros atendidos desde  $t=0$  hasta un  $t$  actual ( $R(t)$ ):** Total de pasajeros que ya llegaron y se bajaron del ascensor en el tiempo  $t$ .
- **Tiempo de espera por pasajero atendido en el tiempo  $t$  ( $W_k(t)$ , para todo  $k \in R(t)$ ):** Tiempo de espera de los pasajeros que ya fueron atendidos.
- **Tiempo de viaje por pasajero atendido en el tiempo  $t$  ( $T_k(t)$ , para todo  $k \in R(t)$ ):** Tiempo de viaje de los pasajeros que ya fueron atendidos.
- **Tiempo de espera por pasajero sin atender ( $Q_k(t)$ , para todo  $k \in P(t)$ ):** Tiempo de espera por pasajero sin atender.

### 3.1.7. Valores Comunes Para la Simulación

Para simular de una manera más cercana a la realidad, se toman como valores comunes los expuestos por [SMBB06].

Item	Lower values	Higher values	Unit
Rated capacity	6	24	persons
Contract speed	0.5	6.0	m s <sup>-1</sup>
Acceleration/deceleration	0.7	0.9	m s <sup>-2</sup>
Door opening/closing times	2.0	3.0	s
Passenger transfer times	0.8	1.5	s

**Figura 3.4:** Rangos comunes de operación en edificaciones

### 3.1.8. Componentes del Simulador

Los componentes de la simulación discreta basada en avance de tiempo se maneja como lo propone Averill para este tipo de sistemas a simular [Kel00].

- **Estado de Sistema:** Son el conjunto de variables necesarias para describir el sistema en un tiempo particular.
- **Reloj de la Simulación:** Es la variable que da el tiempo actual de la simulación.
- **Lista de Eventos:** Lista que contiene el tiempo en el que cada tipo de evento va a ocurrir.
- **Rutina de Inicialización:** Rutina programada para iniciar la simulación en el tiempo 0.
- **Rutina para Manejo del Tiempo:** Es un subprograma que determina el siguiente evento a ocurrir en la lista de eventos.
- **Ruta para Evento:** Rutina que actualiza el estado del sistema cuando un tipo de evento ocurre, hay una rutina para cada tipo de evento.
- **Rutinas de Librería:** Son el conjunto de subprogramas usados para generar observaciones de acuerdo a distribuciones de probabilidad.
- **Generador de Tráfico:** Este componente generará de manera aleatoria los pasajeros que arriban al sistema, la generación de pasajeros se hará usando el modelo de un proceso de Poisson y la aproximación por número de ocurrencias. Un modelo de Poisson es un proceso estocástico en dónde no se tiene certeza del momento en el que ocurrirán los eventos y estos eventos independientes.

- **Generador de Reportes:** Es un subprograma que mide el desempeño del sistema produciendo un reporte una vez la simulación termina.
- **Programa Principal:** Es un subprograma que invoca la rutina de tiempo para determinar el siguiente evento y transferir el control a la correspondiente rutina de evento y actualizar el estado del sistema apropiadamente. El programa principal verifica de igual manera la terminación de la simulación y llama la visualización del reporte estadístico.

## 3.2. Implementación de la Simulación

El desarrollo de un sistema complejo como es un simulador requiere rigurosidad durante el ciclo completo. Para hacer que el sistema sea escalable y manejar la complejidad del mismo, se hace un diseño basado en componentes para iterar más fácilmente e ir incorporando funcionalidades sin perder el control del proyecto.

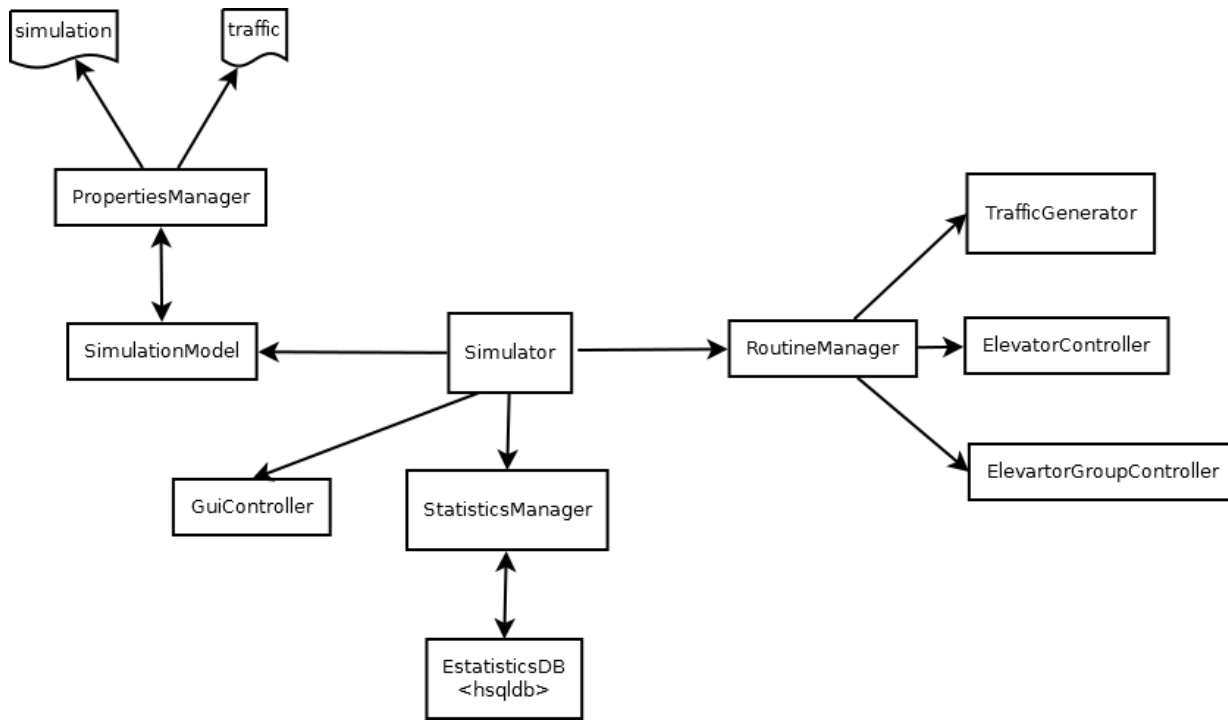
Bajo la premisa que el simulador debe ser adaptable y que cumpla con los requisitos no funcionales de calidad, se deben seguir los principios de diseño que se listan a continuación.

### 3.2.1. Principios de Diseño

- El simulador debe ser parametrizable en los aspectos que tienen mayor relevancia en la simulación.
- La aplicación debe correr en cualquier sistema operativo, debe desarrollarse bajo un lenguaje portable.
- No se desarrollarán rutinas matemáticas o utilitarias si existe una librería de código libre que se pueda usar.
- El simulador debe ser de código libre y abierto para la comunidad científica.
- Es de gran valor presentar la dinámica del sistema gráficamente, con esto cualquiera podría determinar si el sistema es eficiente o no.
- Al final de cada simulación debe mostrarse un informe estadístico del desempeño del sistema.

### 3.2.2. Componentes de Software del Simulador

De acuerdo al análisis realizado y siguiendo los principios de diseño, se contemplan los siguientes módulos del simulador.



**Figura 3.5:** Módulos del Simulador

### 3.2.2.1. Properties Manager

Debido a que el simulador está diseñado para adaptarse a cualquier tipo de edificación así como a los diferentes patrones de tráfico que se experimenten en la misma, es necesario que los parámetros de un sistema en particular puedan ser ingresados en el sistema y el simulador se adapte a tales condiciones imitando de una forma cercana el sistema modelado. Cuando se busca modelar un sistema es necesario reunir un número importante de parámetros que lo representen, estos parámetros por lo general son difíciles de identificar, para obtenerlos puede ser necesario un estudio muy riguroso del mismo, así como contar con una logística apropiada, el sistema analizado será traducido en datos que podrán ingresarse en el sistema, éste debe permitir ingresar los datos de una manera fácil y ágil, además debe permitir exportar estos datos para que sean compartidos con otros usuarios, permitiendo así que un estudio pueda ser incluido en diferentes ordenadores, proporcionando a la comunidad académica datos confiables. Este módulo será el encargado de establecer las datos con los cuales se ejecute la simulación, por nombrar algunos:

#### Del Ascensor

- Número De Pisos
- Número De Ascensores
- Piso Portal
- Velocidad De Ascensor
- Retardo Ingreso en Ascensor
- Máximo Número de Pasajeros dentro del Ascensor

#### De la simulación

- Tiempo de simulación
- Factor de avance
- Número de fracciones de la simulación
- Fuente de tráfico
- Controlador
- Base de datos

### 3.2.2.2. Traffic Generator

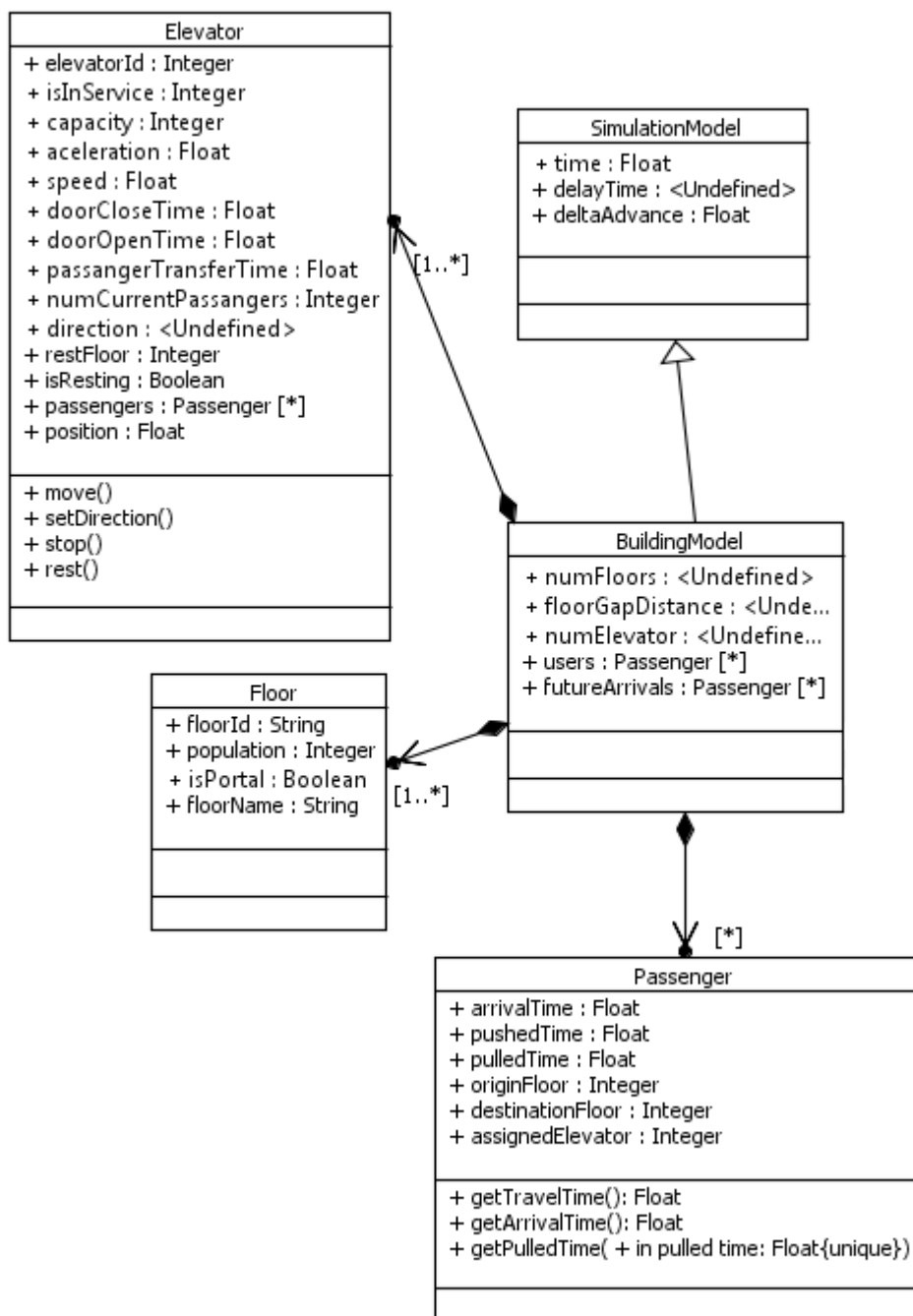
Se entiende por tráfico en una edificación; el movimiento o tránsito de personas dentro del edificio, este tráfico tiene dos componentes tasa de arribo y probabilidad de destino, en donde:

- **Tasa de Arribo:** Es el número de usuarios que llegan al sistema en determinado espacio de tiempo. La tasa de arribo en una edificación cambia de acuerdo a dos factores, uno es el tiempo en el que se mide y otro es el piso en el que se realice la correspondiente medición, este tráfico podemos representarlo como un vector de dos dimensiones, en el cual la tasa de arribo ingresada es el número de pasajeros que entran al sistema cada 5 minutos, se escogió un espacio de tiempo de cinco minutos ya que es representativo para la simulación [Hak03].
- **Probabilidad de destino:** Es la probabilidad que estando en el piso  $P_o$  el pasajero se dirija al piso destino  $P_d$ , esta probabilidad se puede representar como un vector de tres dimensiones en donde los componentes son:  $\langle P_o, P_d, \text{Probabilidad} \rangle$ .

### 3.2.2.3. Simulation Model

Este artefacto representa la edificación simulada con sus pisos, cabinas de ascensor y sus dinámica de movimiento, pasajeros, llamadas. Estas características fueron cargadas del archivo de configuración correspondiente por el componente properties manager.

Este modelo de la simulación va a ser modificado por el modulo principal que ya se explica a continuación y que es el Simulator. A lo largo que toda la simulación este componente será una representación de la edificación la cual servirá para conocer el estado de la simulación.



**Figura 3.6:** Diagrama de clases simulation model

#### 3.2.2.4. Building Simulator

Este componente es el encargado de coordinar las tareas necesarias que se ejecutan durante del ciclo de vida de la simulación lo hace por medio del componente RoutineManager. Es el componente centran de a simulación y tiene comunicación con todos los demás componentes de la simulación.

En la siguiente figura se presenta un diagrama de flujo detallando los pasos que ocurren durante la simulación, la coordinación de estas tareas es responsabilidad del componente central BuildingSimulator.

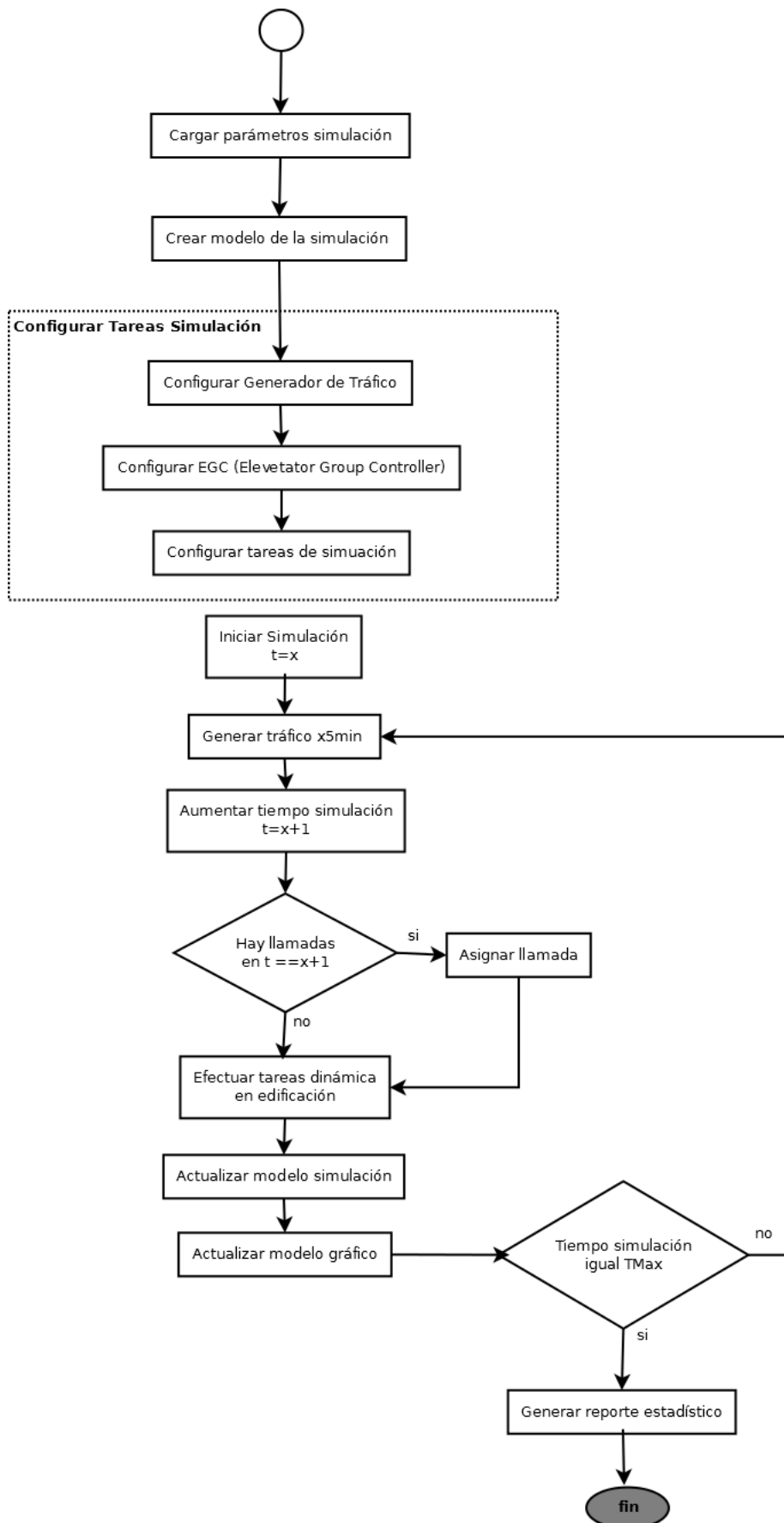


Figura 3.7: Diagrama de flujo resumido simulación

### 3.2.2.5. Routine Manager

Este componente gestiona en un solo hilo de ejecución las tareas: TrafficGenerator, Elevator Group Controller (Rutina para asignar las llamadas) y Elevator Controller (Rutina que ejecuta la dinámica de cada cabina de ascensor). Se decide ejecutarlo en un solo hilo para no perder la sincronización entre las tareas y no introducir error en la simulación por los tiempos de procesamiento que tiene cada una de las tareas que en algunos casos pueden ser significantes.

Este componente gestiona el inicio, ejecución y muerte de cada una de las rutinas que se configuren. Ya que la arquitectura lo permite se podría en cualquier momento introducir una nueva rutina de manera fácil.

### 3.2.2.6. GUI Controller

Este componente será el encargado de mantener un modelo visual 2d de edificación simulada. Además incorporará un componente tipo línea de comandos para poder introducir llamadas al sistema de manera manual. Este componente se ejecuta en un hilo separado del hilo de la simulación, esto para mejorar el desempeño de la aplicación, ya que en este caso no es tan crítico perder algo de sincronía con la simulación es posible mantenerlo en un hilo independiente.

### 3.2.2.7. Statistics Manager

El fin de la simulación es poder verificar el desempeño de los diferentes tipos de controladores para grupo de ascensores en un ambiente similar al ambiente real, para saber si determinado algoritmo de control presenta un rendimiento superior en cuanto a los objetivos trazados (tiempo de viaje, tiempo de espera, energía consumida).

La verificación de esta tesis se hará mediante un estudio de los resultados obtenidos durante la ejecución de la simulación, este estudio incluirá el tiempo de espera de cada pasajero generado por el sistema, así como la energía consumida por los ascensores medida respecto a la distancia recorrida por los mismos. Sería posible realizar este estudio manualmente, y mostrar las cifras que avalen tales resultados, pero con el fin de automatizar este proceso y de hacerlo más entendible y vistoso al usuario final, se creó el módulo de reportes con el cual se generarán los reportes definidos una vez culminada la simulación. El Módulo de Reportes es el encargado de generar y visualizar los reportes generados con los datos obtenidos de la simulación, este módulo contiene 2 componentes.

1. Motor Base De Datos: HsqlDB es una base de datos embebida en el software, se escogió este motor por su alto desempeño de acceso y además por que puede ser embebida en la aplicación, permitiendo así que el software pueda ser ejecutado sin previa instalación de otros productos.
2. Gráficas Estadísticas: JasperReports motor de reportes opensource desde el cual se puede exportar el reporte a formatos PDF, EXCEL, HTML.

### 3.2.3. Modelo de Clases

La siguiente imagen muestra el diagrama de clases del simulador, detallando las relaciones que existen entre las clases que usa el simulador.



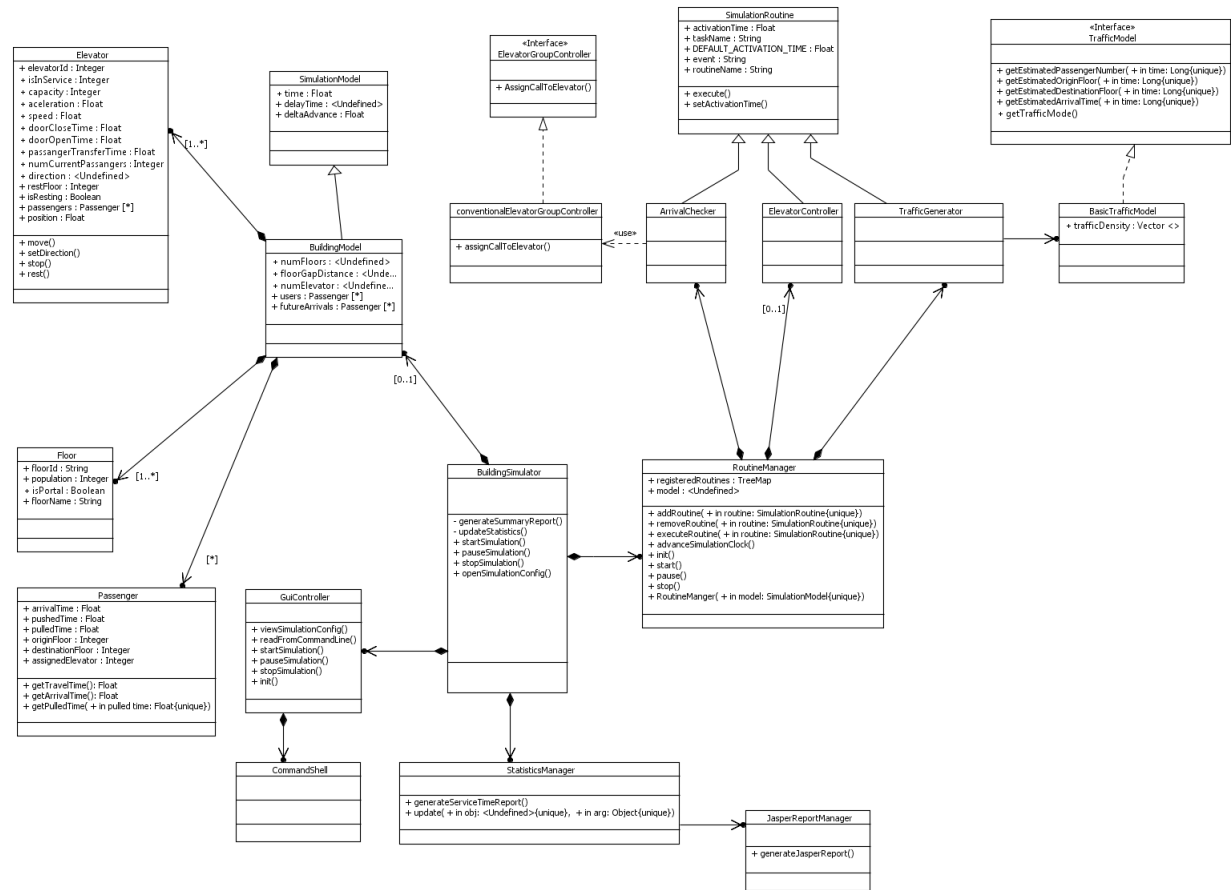


Figure 3.8: Diagrama de clases

### 3.2.4. Dinámica de Arribo de Pasajeros

Los usuarios arribaran al sistema siguiendo un proceso de Poisson, esto es aceptado en generalmente en las investigaciones de este tipo [Bar03]. La distribución de Poisson ha sido también usada para describir otros fenómenos como: la generación de partículas radioactivas o la cantidad de llamadas que son recibidas por una central telefónica.

La probabilidad de tener  $n$  pasajeros en el intervalo de tiempo  $T$  para una tasa de arribo obtenida de la experiencia de  $\lambda$  (en llamadas por intervalo de tiempo) es:

$$p_r(n) = \frac{(\lambda T)^n}{n!} e^{-\lambda T}$$

### 3.2.5. Diseño del Controlador de Grupo de Elevadores

- El elevador no llevara a un pasajero dentro del ascensor en dirección contraria a la que él se dirige.
- La capacidad de cada ascensor son  $n$  personas, y si el cupo está lleno no atenderá llamadas.
- Un elevador viaja a una velocidad constante de  $n$  pisos por segundo.
- Atender cada piso toma  $n$  segundos. Durante este tiempo entran y salen del ascensor  $\alpha$  personas, por lo tanto el tiempo que el ascensor está detenido en cada piso es:  $n + \alpha(\rho)$ , en donde  $\rho$  es un factor multiplicador.
- Un ascensor no ignorará ninguna llamada, a no ser que esté ejecutando una de las restricciones anteriormente mencionadas.

### 3.2.5.1. Controlador Convencional

El diseño de controladores convencionales en el campo de tráfico de pasajeros en edificaciones está orientado por reglas de tráfico fijas en las cuales no se tienen en cuenta la optimización del servicio. Esta aproximación no tiene en cuenta la naturaleza dinámica del problema que implica parámetros de operación cambiantes -por patrones de tráfico diferentes y fluctuaciones en el transcurrir normal de los mismos-.

En la actualidad se han normalizado un grupo de algoritmos para el control de elevadores, éstos se programan en microprocesadores y se convierten en soluciones generalizadas al problema del control de tráfico [MLdZCPSSdP96]. A continuación se describen brevemente los principios básicos de los algoritmos más empleados.

- **Maniobra Universal Por Pulsadores:** Cuando el ascensor está desocupado, y es el primero en recibir la orden ira a atender la llamada. Si durante el funcionamiento se solicita el ascensor desde cualquier otra planta la llamada será ignorada y el carro seguirá obedeciendo la orden que ha iniciado la llamada.
- **Maniobra Duplex:** Cualquier llamada es atendida por el elevador que se encuentre libre; pero si están libre dos elevadores, acudirá a la llamada el que esté mas próximo al piso origen del llamado. Solamente acude un elevador a cualquier llamado.
- **Maniobra Colectiva selectiva en los dos sentidos:** El elevador va a registrar únicamente los llamados que se generen en el sentido que va el ascensor. Es decir si el ascensor va hacia arriba sólo se registrarán los llamados que se hagan en los pisos superiores, y si va hacia abajo sólo registrará los que se generen en pisos inferiores. El sentido se invierte cuando el elevador llega al último piso, ya sea por una llamada de piso o una llamada de ascensor.

#### Reglas Básicas

El control convencional usualmente atiende las llamadas hechas por los pasajeros siguiendo ciertas reglas básicas:

- El elevador no llevara a un pasajero dentro del ascensor en dirección contraria a la que él se dirige.
- La capacidad de cada ascensor son  $n$  personas, y si el cupo está lleno no atenderá llamadas.
- Un elevador viaja a una velocidad constante de  $n$  pisos por segundo.
- Atender cada piso toma  $n$  segundos. Durante este tiempo la persona entrara o saldrá del ascensor. Si el número de personas es mayor que  $n$  se necesitaran de  $n+2$  segundos.
- Un ascensor no ignorará ninguna llamada, a no ser que esté ejecutando una de las restricciones anteriormente mencionadas.

### 3.2.6. Criterios De Desempeño

Para medir la eficiencia del sistema de control usado, usualmente se tienen criterios de desempeño orientados al servicio. Estos criterios buscan reducir la insatisfacción del cliente en cuanto al tiempo que invierte para movilizarse desde su piso origen hasta el piso destino. El criterio de desempeño más usado en cualquier tipo de edificación diurna va en busca de reducir el tiempo de espera que el pasajero gasta desde que oprime el botón de llamada y el tiempo que el ascensor toma para llevar el pasajero a su piso destino [HH08].

Se tendrán en cuenta como criterios de optimización de servicio el “Tiempo de Espera” y el “Tiempo de Viaje”.

- **Tiempo de Espera:** Uno de los factores que justifica como objetivo el tiempo de espera es que psicológicamente una pasajero pierde la paciencia después de esperar 60 segundo en promedio [Bar03].
- **Tiempo de Viaje:** Es también comprobable que psicológicamente una persona espera a lo sumo que el tiempo desde que toma el ascensor hasta que llega a su piso destino no debe ser mayor a los 90 segundos [Bar03].
- **Situación de emergencia:** por medio de estudios realizados se determinó que el el tiempo en el que se debe efectuar una evacuación completa de una edificación esta entre los 15 y 30 minutos [Hak03].

### 3.2.6.1. Desempeño dado por el Tiempo De Espera

En un sistema de elevadores con buen desempeño se observa que el tiempo de espera sigue una distribución exponencial [Bar03], de esta forma:

$F_t = \exp(-t/T_{av})$ , en donde  $T_{av}$ , es el promedio de tiempo de espera y  $F_t$  muestra las fracciones de tiempos de espera que que exceden el tiempo  $t$ .

Service level	Average waiting time	% of passengers served within		
	(s)	30 s	60 s	90 s
Excellent	< 20	75%	95%	99%
Good	20 – 30	65%	85%	95%
Satisfactory	30 – 40	50%	75%	90%
Acceptable	40 – 60	40%	60%	75%

**Figura 3.9:** Criterio de desempeño <Tiempo de Espera>

### 3.2.6.2. Desempeño dado por el Tiempo De Viaje

Para el “Tiempo de Viaje” se usa una distribución Gamma. Los límites de esta se encuentran en la Figura 3.11.

Service level	Average time to destination	% of passengers served within		
	(s)	90 s	120 s	150 s
Excellent	< 80	70%	85%	95%
Good	80 – 100	40%	75%	90%
Satisfactory	100 – 120	15%	50%	80%
Acceptable	120 - 150	5%	20%	55%

**Figura 3.10:** Criterio de desempeño <Tiempo de Viaje>



## 4 Modelo de Sistema Multi Agente

El uso de una arquitectura distribuida basada en Sistemas Multiagente para el problema de trafico de edificación trae ventajas como la tolerancia a errores debido a la independencia en las tareas básicas de los agentes. La separación de responsabilidades, el débil acoplamiento de los componentes también se traducen en una ventaja para el diseño del sistema, ofreciendo una solución más escalable en el tiempo y adaptable computacionalmente.

En este trabajo se propone el uso del concepto de Sistema Multi-Agente (SMA) para modelar las entidades, comportamientos y relaciones que existen dentro del sistema.

El diseño de sistema multiagente propuesto toma cada cabina de ascensor como un agente que quiere participar por obtener una llamada. Aquel que presente una mejor oferta “mejor servicio” la atenderá. La lista de agentes participantes puede ser variable dependiendo del estado de los agentes -ACTIVO, FUERA DE SERVICIO-, si una cabina pasa a un estado “FUERA DE SERVICIO” significa que no puede participar en la subasta de la llamada y que debe apoyarse en los demás “agentes de cabina” para que se hagan cargo de sus llamadas asignadas. Por ésto y por otras razones como escalabilidad y separación de responsabilidades una arquitectura “NO Centralizada” es adecuada. Aunque podría hacerse de manera tradicional, por diseño de software y pensando en la evolución del algoritmo de asignación de llamadas “objetivo del trabajo de grado” es preferible mantenerlo en una entidad separada. De esta manera el algoritmo de asignación de llamadas puede cambiar en cuanto a su implementación -Fuzzy, RPSO, AG, etc- y comportamiento -prioridad en los objetivos de control- de manera independiente, sin que tengan que conocerlo los agentes controladores de cabina.

La elección de la cabina más apropiada para atender una llamada se hace por medio de un agente “árbitro del sistema”, el cual evalúa las ofertas de las cabinas y la asigna usando un motor de inferencia difuso a aquel que presente una mejor oferta. Éste mismo enfoque -de tener un agente central que asigna la llamada- es usado por Yunww Gu en el artículo “Multi-Objective Optimization of Multi-Agent Elevator Group Control System Based on Real-Time Particle Swarm Optimization Algorithm” con buenos resultados, usando un motor de inferencia basado en partículas RPSO [Gu12].

### 4.1. Descripción General De Los Agentes

En este caso particular existen varios actores que interactúan con el medio, por ejemplo las cabinas de ascensor tienen como función transportar el tráfico entre las plantas de la edificación. Otro actor es el mecanismo encargado de determinar la asignación de las llamadas a las cabinas de ascensor. La identificación de estos actores y el modelado bajo el paradigma analítico de SMA se detallan a continuación.

Los roles están dados por los objetivos de los agentes. El paradigma es analítico tomando como base la realidad diferenciándose al modelo de AOPOA que es más deductivo en donde los agentes no son evidentes y son descubiertos recursivamente bajo el paradigma organizacional. De acuerdo a éste acercamiento de modelado se identifican 5 agentes, que son abstracciones de las entidades que existen en la realidad en un sistema de grupo de elevadores. En el modelo de éste trabajo se hizo una descomposición de metas y submetas que intrínsecamente le dan los roles a los agentes, los cuales son invariantes en el tiempo.

El objetivo general del sistema multiagente es el de servir eficientemente los usuarios del sistema. Dado ésto algunos agentes tienen tareas de estimación, otros de movilización de pasajeros, otro es el que se encarga de resolver los conflictos generados entre los agentes cuando compiten por una llamada de elevador, tal como lo haría un árbitro en problemas de la vida real.

- **Agente Controlador de Cabina**

Este agente es el encargado de ejecutar las acciones de control con el fin de movilizar los pasajeros del ascensor desde su piso de origen hasta su piso destino.

#### ■ Agente Arbitro del Sistema

La función de este agente es la servir de conciliador cuando se generan conflictos entre los agentes controladores de cabina que están compitiendo por servir una llamada, así mismo mantiene un monitoreo sobre el estado de servicio de los agentes, para que dado el caso si hay llamadas que no pueden ser servidas por un agente cabina éstas sean reasignadas.

#### ■ Agente Estimador Patrón de Tráfico

La función de este agente es medir las variables ambientales y determinar el tipo de tráfico presente en la edificación, esta información que provee el agente sirve como criterio de decisión en el momento de la asignación de la llamada.

#### ■ Agente Estimador Tiempo Espera

Este agente tiene como función predecir el tiempo que tarda una cabina en llegar desde su piso origen hasta el piso en donde se encuentra la llamada, para hacer esta estimación utiliza una red neuronal que es alimentada con variables tomadas del ambiente.

#### ■ Agente Estimador Tiempo Viaje

La función de este agente es predecir el tiempo que tarda en llegar un pasajero desde su piso origen hasta su piso destino, para hacer esta estimación utiliza una red neuronal que es alimentada con variables tomadas del ambiente.

### 4.1.1. Descripción del Ambiente

El ambiente está compuesto por la edificación simulada, la cual es un sistema abierto integrado por pisos, pasajeros, llamadas, cabinas de ascensor, y la dinámica tanto de tráfico como de la cinemática de los elementos físicos usados para transportar los usuarios del sistema.

Los agentes funcionan inmersos en un entorno que constituyen la entidades pasivas, y se comunican entre sí a través de protocolos de comunicaciones en donde deben estar garantizadas las características de autonomía de cada uno de ellos.

En la tabla No. 4.2 se muestra la descripción del ambiente.

Nombre Entidad	Descripción	Tipo
<b>Edificio</b>	Espacio dentro del cual se movilizan personas u objetos, es el ente contenedor de los elevadores del sistema.	Entidad Pasiva
<b>Ascensor</b>	Es el objeto que se encarga de recorrer el edificio transportando a las personas entre sus diferentes pisos	Entidad Pasiva
<b>Piso(s)</b>	Objeto componente del edificio, a través de los cuales se desplaza el elevador transportando a las personas	Entidad Pasiva
<b>Pasajero</b>	Es el objeto a transportar entre las diferentes plantas o pisos de la edificación, presenta un comportamiento aleatorio en cuanto a la tasa de arribo	Actor

**Cuadro 4.1:** Descripción del ambiente

#### 4.1.2. Descripción Detallada de Agentes

Nombre	Agente Controlador de Cabina	
Sensores	Sensor de peso	Determina el número de personas presentes en la cabina, basándose en el peso de estas
	Sensor de Puerta	Identifica si la puerta del ascensor se encuentra abierta o cerrada
	Sensor de Piso	Detecta si el ascensor a llegado a un piso
	Sensor de Llamada	Detecta que se genera una llamada en el sistema con con piso origen (po) y un piso destino (pd)
Actuadores	Actuador de puerta	Se encarga de abrir o cerrar la puerta para el ingreso o salida de pasajeros
	Actuador de Cabina	Hace que la cabina del ascensor se dirija en una dirección determinada (arriba, abajo)
Meta	<ul style="list-style-type: none"><li>* Movilizar a un pasajero de un piso origen a un piso destino en el menor tiempo posible.</li></ul> <b>Submetas</b> <ul style="list-style-type: none"><li>* Notificar los estados en los que se encuentra una llamada: aceptada, recogida, despachada.</li><li>* Enviar la oferta para competir por la llamada generada.</li><li>* Abrir y cerrar las puertas de la cabina del ascensor para permitir el ingreso y la salida de pasajeros.</li><li>* Controlar el motor de la cabina para desplazar hacia arriba o hacia abajo.</li><li>* Activar el freno de la cabina en determinado lugar para detenerse.</li><li>* Participar en la apuesta para obtener una llamada generada en el sistema.</li></ul>	

Nombre	Agente Arbitro del Sistema	
<b>Sensores</b>	Sensor de llamada generada	Determina en que piso se esta generando la llamada
<b>Actuadores</b>	Actuador asignador de llamada	Basándose en los criterios establecidos el actuador identifica una cabina de ascensor que pueda atender eficientemente la llamada
<b>Meta</b>	<p>* Solucionar los conflictos entre las los agentes controladores de cabina para asignar la llamada, este flujo de asignación utiliza en protocolo contract-net.</p> <p>* Identificar cuales agentes cabina no está en servicio para no tenerlos en cuenta en la asignación.</p> <p>* Reasignar las llamadas pertenecientes a un agente cabina que cambia a estado fuera de servicio.</p> <p>* Seleccionar de manera eficiente cual de las cabinas oferentes pueda atender las llamadas generadas dentro de la edificación.</p>	

Nombre	Agente Estimador Patrón de Tráfico	
<b>Actuadores</b>	Registrador en BDD.	Se encarga de registrar en la BDD la llamada generada para así determinar el patrón de tráfico presente en el sistema (Subida, bajada y entre pisos)
<b>Recursos</b>	Base de datos estadísticos	Recurso de base de datos propia del agente en donde registra las llamadas que ingresan al sistema
<b>Meta</b>	<p>* Identificar el tipo de tráfico que se esta presentando en la edificación (subida, bajada y entre pisos).</p> <p><b>Tareas</b></p> <p>* Registrar las llamadas generadas en el sistema.</p> <p>* Obtener las llamadas para generar estadísticas.</p>	



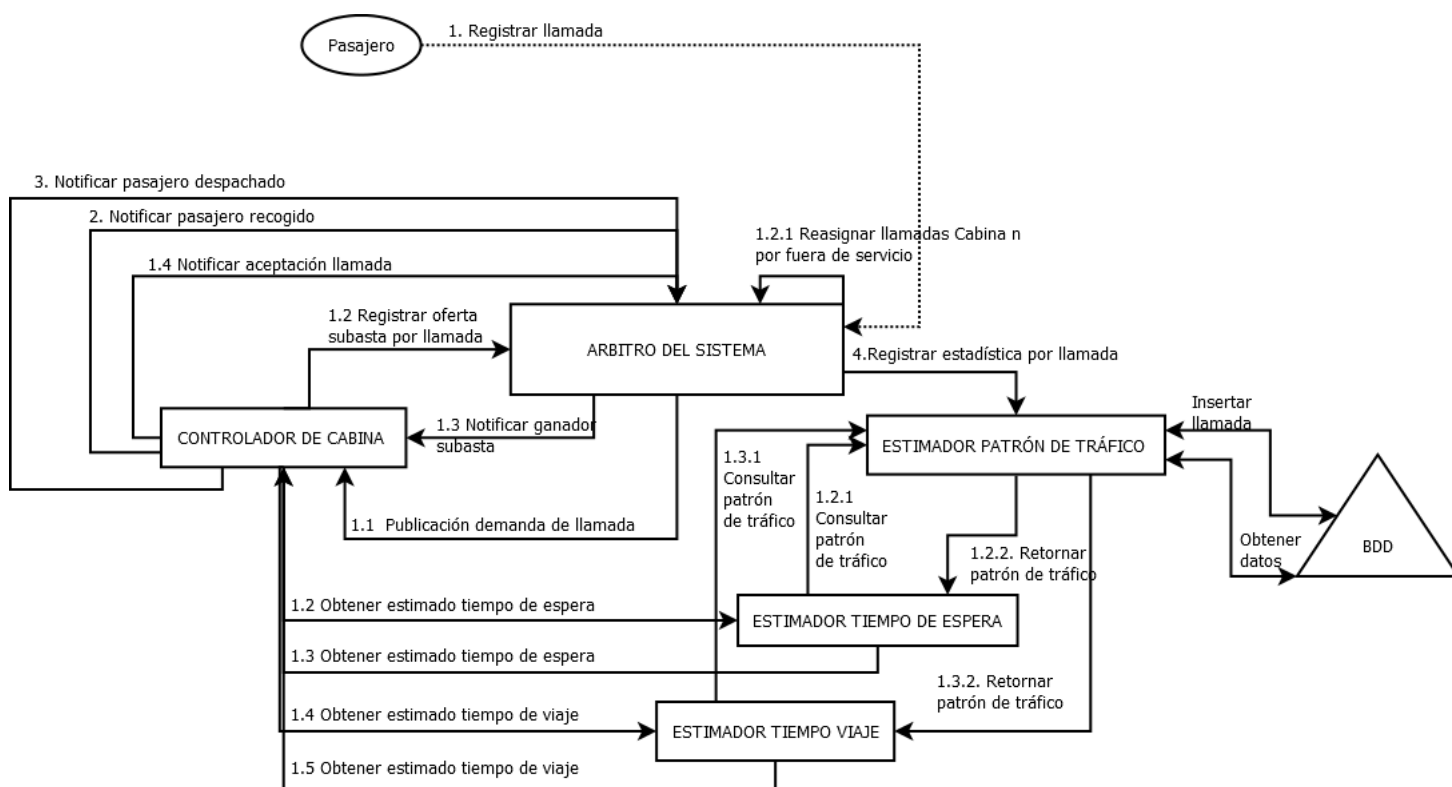
Nombre	Agente De Servicio Estimador Tiempo de Espera	
Sensores	Sensor Posición del elevador	Determina el piso en el que se encuentra el elevador en el momento en el que se genera la llamada
	Sensor Pasajeros en el elevador	Determina el número de pasajeros en el elevador en el momento en el que se genera la llamada
	Sensor Dirección del elevador	Determina la dirección del elevador en el momento en el que se genera la llamada
Actuadores	Estimador de Tiempo	Se encarga de estimar el tiempo que debe esperar un pasajero desde el momento en que ingresa la llamada hasta que la cabina llega al piso en el que se encuentra para atenderla
Meta	* Llevar la estadística de llamadas para determinar el porcentaje de tráfico de salida-entrada-entrepisos en el momento en el que se genera la llamada. * Estimar de manera acertada la cantidad de tiempo que debe esperar un pasajero desde el momento en que ingresa la llamada hasta que la cabina llega al piso en el que se encuentra para atenderla	

Nombre	Agente Estimador Tiempo de Servicio	
Sensores	Sensor Pasajeros en el elevador	Determina el número de pasajeros en el elevador en el momento en el que se genera la llamada
	Sensor Dirección del elevador	Determina la dirección del elevador en el momento en el que se genera la llamada
Actuadores	Estimador de Tiempo	Se encarga de estimar el tiempo que debe esperar un pasajero desde que es recogido en su piso origen hasta que es llevado a su piso de destino
Meta	* Llevar la estadística de llamadas para determinar el porcentaje de tráfico de salida-entrada-entrepisos en el momento en el que se genera la llamada. * Estimar de manera acertada la cantidad de tiempo que debe esperar un pasajero desde que es recogido en su piso origen hasta que es llevado a su piso de destino.	

## 4.2. Interacciones

Los agentes del sistema deben interactuar con el fin de atender las llamadas de ascensor que se generan en el sistema. Éstas llamadas son registradas por los pasajeros y recibidas por el árbitro del sistema que establece la subasta en la que los agentes controladores de cabina compiten por obtener la llamada. Así mismo si un agente controlador de cabina necesita pasar al estado fuera de servicio es necesario que le informe al árbitro del sistema para que éste las reasigne y éstas llamadas no queden sin ser atendidas.

Las diferentes interacciones entre los agentes se muestran en la siguiente figura. De éstas interacciones se detallará sobre 3 de ellas que son las más importantes para cumplir con los objetivos de control del sistema -reducir el tiempo de espera, tiempo de viaje y la energía consumida por el sistema-.



**Figura 4.1:** Diagrama Interacciones

En la siguiente tabla se explican las interacciones entre los agentes a excepción de los mecanismos cooperativos, éstos se explicarán más adelante en la sección de cooperación.

ID	NOMBRE	DATOS	DESCRIPCIÓN
IN 1.2.2	ESTIMAR PATRÓN DE TRÁFICO	1. Número de pasajeros entrando a la edificación	Información del patrón de tráfico presente en la edificación (Subida, bajada y entre pisos)
		2. Número de pasajeros saliendo de la edificación	
		3. Número de pasajeros moviéndose entre pisos en la edificación	
		4. Tiempo en el que se encuentra la simulación	
IN. 1.3	ESTIMAR TIEMPO DE ESPERA	1. Piso en el que se encuentra el elevador	Pronóstico del tiempo que puede tardar el ascensor en llegar al piso origen de la llamada, este agente utiliza un estimador basado en redes neuronales.
		2. Carga del elevador	
		3. Porcentaje de la población de la edificación que se dirige desde un piso portal hacia pisos superiores	
		4. Porcentaje de la población de la edificación que se dirige desde los pisos superiores hacia el piso portal	
		5. Porcentaje de la población de la edificación que se esta trasladando entre los pisos superiores de la edificación	
		6. Dirección en la que se dirige la cabina de ascensor	
IN. 1.5	ESTIMAR TIEMPO DE VIAJE	1. Carga del elevador	Pronóstico del tiempo que tarda el pasajero en la cabina de ascensor desde el piso origen hasta el piso destino, este agente utiliza un estimador basado en redes neuronales.
		2. Porcentaje de la población de la edificación que se dirige desde un piso portal hacia pisos superiores	
		3. Porcentaje de la población de la edificación que se dirige desde los pisos superiores hacia el piso portal	
		4. Porcentaje de la población de la edificación que se esta trasladando entre los pisos superiores de la edificación	
		5. Dirección en la que se dirige la cabina de ascensor	

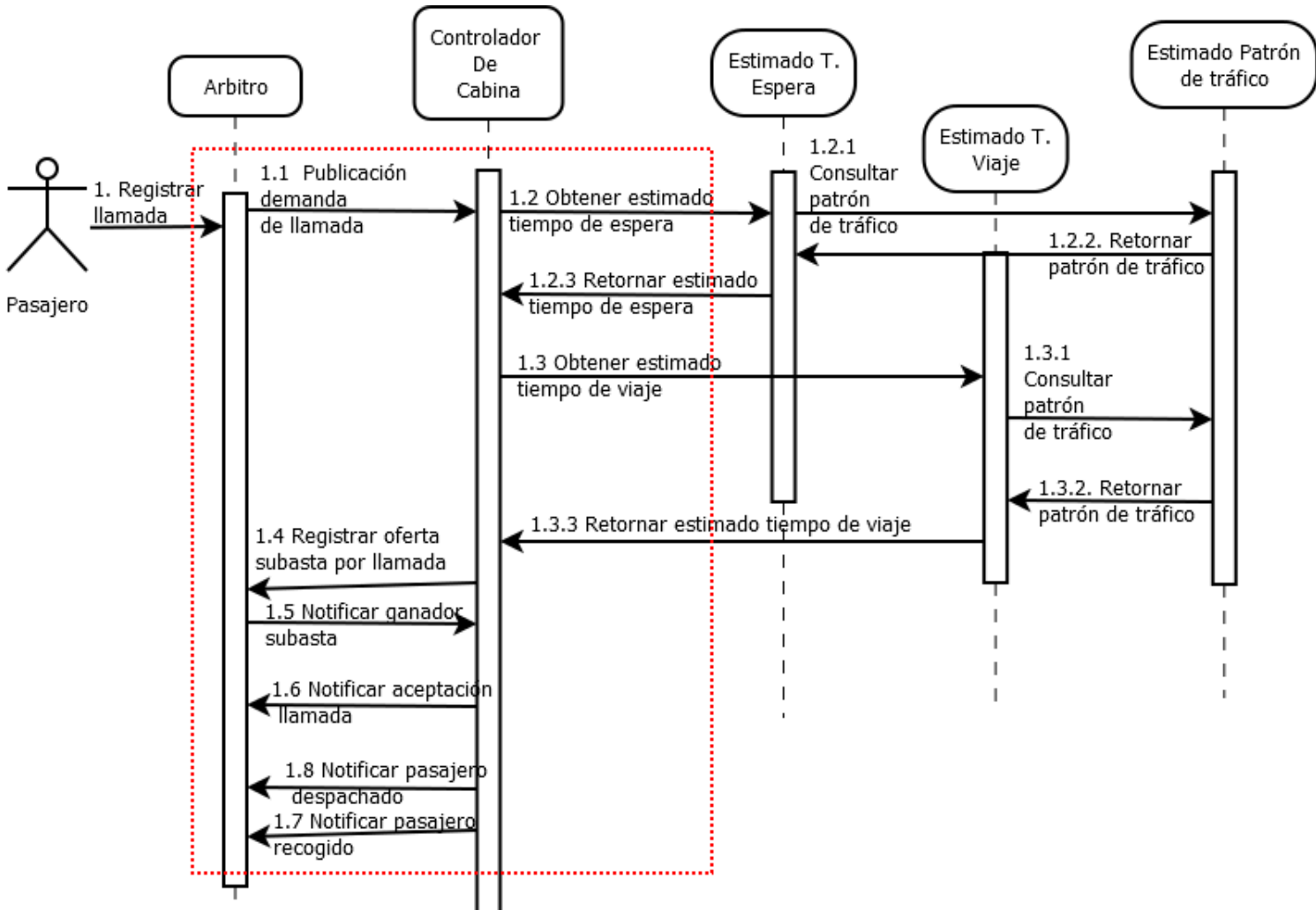
Cuadro 4.3: Descripción de las interacciones

#### 4.2.1. Cooperación

Es el proceso por el que ciertos agentes participantes generan deberes mutuamente dependientes en actividades conjuntas. En este caso la cooperación tiene como fin servir las llamadas generadas en el sistema, cada uno de los agentes tiene la intención de atender cada llamada pero solo uno de éstos lo hace más eficientemente que los otros.

**Resolución del Conflictos** De acuerdo al modelo multiagente se presenta un conflicto por los objetivos antagónicos entre los agentes Controladores de Cabina. Este conflicto ocurre cuando los agente de cabina compiten por una llamada registrada.

Para solucionar éste conflicto se plantea un mecanismo de subasta en donde los agentes que compiten por la llamada envían información relevante para que el Arbitro tome la decisión de asignar la llamada a aquel que la pueda atender en mejor medida de acuerdo a los objetivos de control. Se utiliza el protocolo contract-net extendido basado en las siguientes interacciones.



**Figura 4.2:** Diagrama flujo vínculos cooperativos

**Ejemplo 1 (Sin conflictos)** Tomemos el caso en dónde llega una llamada al sistema, esta llamada la recibe el árbitro del sistema y éste le envía a cada uno de los agentes controladores de cabina las características de la llamada.

En éste ejemplo solo un ascensor está en servicio, por lo tanto el árbitro solo recibe una oferta de aquella cabina que está disponible. Ya que no hay más oferentes para llamada el árbitro la asigna al único agente de cabina que se interesó en la llamada y le notifica que es el ganador de la llamada.

El agente cabina incluye la llamada en su lista de llamadas y notifica al árbitro que la va a atender. Una vez la cabina llegue al sitio origen de llamada, notifica al árbitro que ya la recogió. Cuando deje al pasajero en su piso destino, notifica nuevamente al árbitro que el pasajero fue servido.

**Ejemplo 2 (Conflictos)** En este segundo ejemplo todos los agentes están disponibles para atender la llamada. La llamada la recibe el árbitro del sistema y éste le envía a cada uno de los agentes controladores de cabina las

características de la llamada.

Ya que hay más agentes de cabina pujando por la llamada, cada uno de éstos calcula el tiempo de espera, el tiempo de viaje, su porcentaje de ocupación, las otras llamadas que tenga en el piso origen y destino de la llamada. Con éstos datos el árbitro decide de acuerdo a los objetivos de control cuál de los ascensores será el ganador de la subasta por la llamada, aquel que haya hecho la mejor oferta será el que se quede con la llamada.

Decidido quien atenderá la llamada, le notifica al agente cabina ganador.

El agente cabina incluye la llamada en su lista de llamadas y notifica al árbitro que la va a atender. Una vez la cabina llegue al sitio origen de llamada, notifica al árbitro que ya la recogió. Cuando deje al pasajero en su piso destino, notifica nuevamente al árbitro que el pasajero fue servido.

### 4.3. Inferencia en los Agentes Controladores de Cabina

Los agentes cabina deben hacer la oferta por la llamada generada, esta oferta contiene datos que pueden ser calculados como el porcentaje de ocupación, las paradas en piso origen y destino. Pero otras características de la oferta son apenas estimadas, estas son el tiempo de espera que va a tener el pasajero y el tiempo de viaje.

El mecanismo por el cuál se estiman estos tiempos es por medio de redes neuronales, ya es conocido que las redes neuronales tiene la característica de predecir una salida de acuerdo a unas entradas, o para decirlo en otros términos de mapear unas entradas a una salida, en éste caso se deben predecir los tiempo de acuerdo a unas características temporales [Rao95].

Las investigaciones en el campo de las redes neuronales muestran que esta técnica tiene un enorme potencial en la clasificación de características y el reconocimiento de patrones [GZ97]. Cómo los modelos biológicos que lo inspiraron las RNA tiene capacidad de aprender de la experiencia. La experiencia es dada por ejemplos de la realidad en dónde la red neuronal es capaz de capturar las relaciones existentes entre los datos presentados. Por lo tanto las redes neuronales son apropiadas para problemas en los que el conocimiento del problema es difícil de especificar y en los que se cuentan con suficientes datos observados para su análisis[GZ97].

Cualquier método de predicción asume que hay una relación entre los datos de entrada y las salidas. Frecuentemente los modelos de predicción estadísticos tiene limitaciones en la estimación de la función que aproxima la predicción debido a la complejidad del sistema real, las redes neuronales pueden ser una buena alternativa para aproximar esta función continua [Miy88]. Los modelos estadísticos de predicción son generalmente lineales pero los problemas en la vida real son generalmente no lineales, las redes neuronales tiene el potencial de modelar sistemas no lineales[Gra93].

Para nuestro problema se usará una red neuronal para que dadas ciertas condiciones de tráfico pueda estimar -basada en la experiencia- cuanto tiempo tardará en llegar un ascensor al piso en el que se generó una llamada y cuanto tiempo puede transcurrir para que éste pasajero llegue a su piso destino. Esta estimación como se puede observar tiene una muy buena aproximación, lo que le permitirá al motor de inferencia contar con más información para así decidir con claridad cuál de las cabinas es más apropiada para ser enviada al piso en el que el pasajero aguarda.

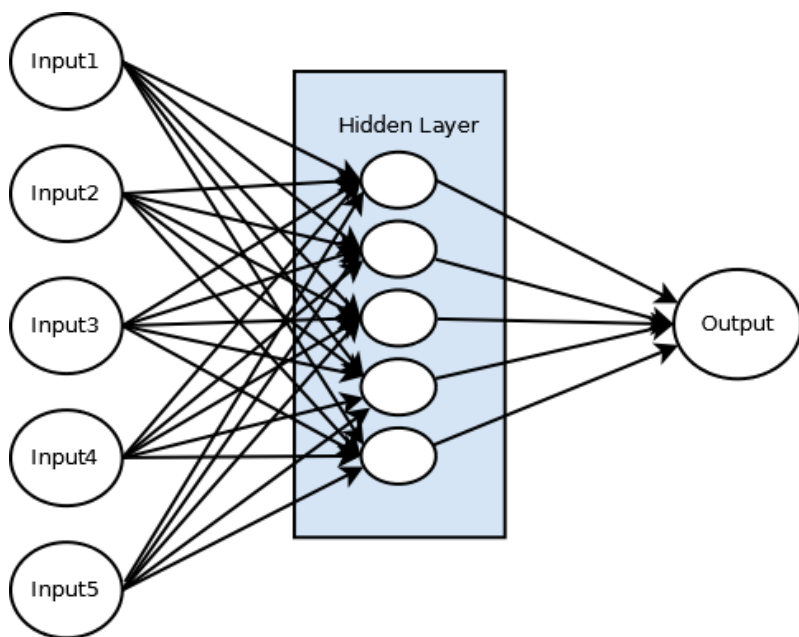
#### 4.3.0.1. Estimar Tiempo De Espera Y El Tiempo De Viaje

El tiempo que un pasajero debe esperar desde el momento en que presiona el botón para registrar la llamada hasta que el ascensor pasa a recogerlo no es preciso. No es posible conocerlo con anticipación ya que depende de las futuras llamadas que se hagan al ascensor y de los desplazamientos que éste deba hacer. Debido a esta naturaleza de incertidumbre en la determinación del tiempo de espera es necesario hacer una predicción teniendo como principal criterio el tráfico que se está generando en la edificación.

Este mismo caso ocurre con el tiempo de viaje que debe hacer un pasajero, la naturaleza de éste es incierta pero se podría determinar un valor cercano haciendo uso de un estimador basado en redes neuronales. A continuación se presenta la arquitectura de red para los 2 casos.

Las entradas en ambos casos se presentan de manera normalizada para que la convergencia a la solución sea más rápida, las salidas de la red neuronal son una estimación en cuanto al tiempo que debe esperar o viajar un pasajero, esta salida también está normalizada. Después de explicar la topología de las redes, sus entradas, salidas se ahondará en el entrenamiento de éstas.

**Arquitectura Red Estimador Tiempo de Viaje** Mediante la observación y múltiples pruebas se determinó que la mejor configuración de la red neuronal artificial es tener 5 neuronas en la capa de entrada, 50 neuronas en la capa oculta y 1 neurona de salida. A continuación se explicará cuales son las entradas de la red neuronal y su salida.



**Figura 4.3:** Arquitectura ANN Tiempo de Espera

#### ■ Entradas

- **Pasajeros dentro del elevador:** es el número de pasajeros que se encuentran el elevador, esta entrada se obtiene del agente controlador de cabina.
- **% Tráfico de entrada de entrada:** es el porcentaje de tráfico que cumple con un patrón de ENTRADA, es decir que está llegando a la edificación. Se obtiene del agente Estimador Patrón de Tráfico.
- **% Tráfico de entrada de salida:** es el porcentaje de tráfico que cumple con un patrón de SALIDA, es decir que abandonando la edificación. Se obtiene del agente Estimador Patrón de Tráfico.
- **% Tráfico de entrada de entre pisos:** es el porcentaje de tráfico que cumple con un patrón de ENTRE PISOS, es decir el porcentaje de la población en la edificación que se está moviendo entre los pisos de la edificación. Se obtiene del agente Estimador Patrón de Tráfico.
- **Dirección del elevador:** esta la dirección en la que se dirige la cabina ARRIBA o ABAJO, esta entrada se obtiene del agente controlador de cabina.

#### ■ Salida

- **Tiempo de viaje:** Valor estimado del tiempo de viaje, se normaliza a un valor entre 0 y 1.

**Aprendizaje y Entrenamiento** La red neuronal mapea una serie de entradas en una serie de salidas. Este mapeo no lineal se hace a través de una superficie multidimensional, el objetivo de la fase de aprendizaje y entrenamiento es moldear esta superficie de acuerdo a la respuesta requerida [Rao95].

El entrenamiento de esta red neuronal se hace de manera supervisada, proveyendo a la red de ejemplos de tiempos de viaje obtenidos en el simulador usando un controlador convencional. La evolución por épocas de la red neuronal con un coeficiente de aprendizaje de 0.6 y un momentum de 0.1, se muestra a continuación. Éstos parámetros de entrenamiento se encontraron que eran los más apropiados para el entrenamiento por medio de la experimentación.

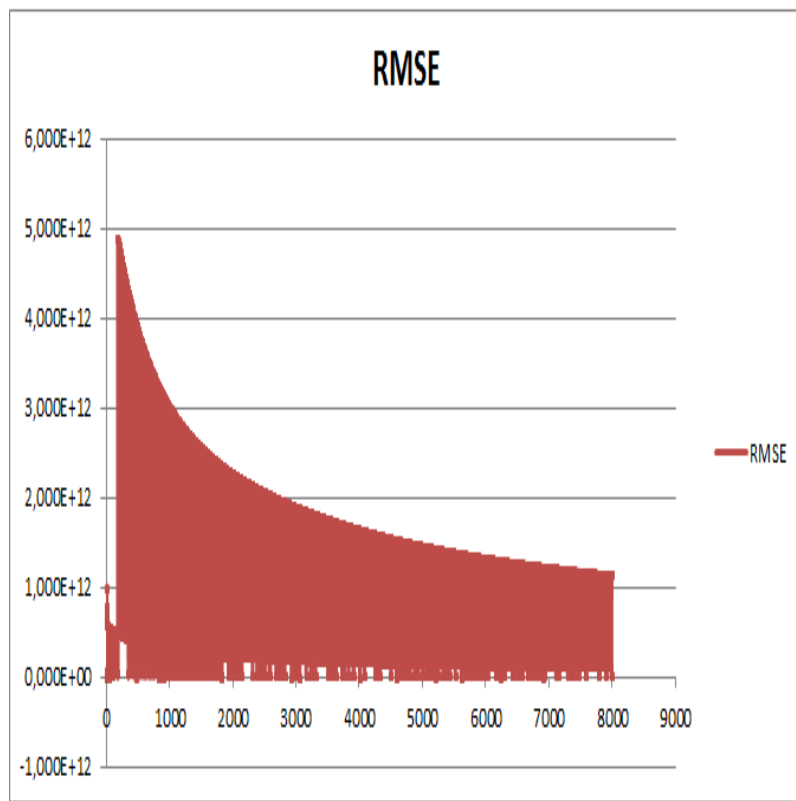


Figura 4.4: Raíz del error cuadrático para el estimador Tiempo Viaje

**Arquitectura Red Estimador Tiempo de Espera** Ésta red neuronal artificial está encargada de estimar el tiempo que un pasajero debe esperar desde que registra la llamada hasta que una cabina de ascensor llegue a recogerlo. Se determina por experimentación que la red debe estar compuesta de 6 neuronas de entrada, 50 neuronas en la capa oculta y 5 neuronas de salida. A continuación se detallan las entradas.

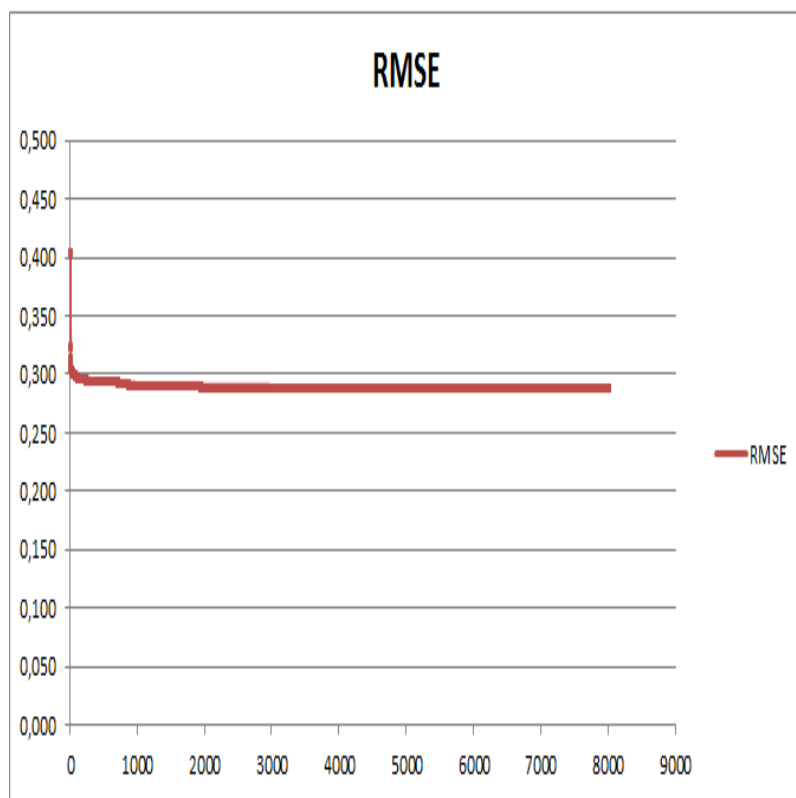
#### ■ Entradas

- **Posición del elevador:** es el piso en el que se encuentra el elevador, esta entrada se obtiene del agente controlador de cabina.
- **Pasajeros dentro del elevador:** es el número de pasajeros que se encuentran el elevador, esta entrada se obtiene del agente controlador de cabina.
- **% Tráfico de entrada de entrada:** es el porcentaje de tráfico que cumple con un patrón de ENTRADA, es decir que está llegando a la edificación. Se obtiene del agente Estimador Patrón de Tráfico.
- **% Tráfico de entrada de salida:** es el porcentaje de tráfico que cumple con un patrón de SALIDA, es decir que abandonando la edificación. Se obtiene del agente Estimador Patrón de Tráfico.
- **% Tráfico de entrada de entre pisos:** es el porcentaje de tráfico que cumple con un patrón de ENTRE PISOS, es decir el porcentaje de la población en la edificación que se está moviendo entre los pisos de la edificación. Se obtiene del agente Estimador Patrón de Tráfico.
- **Dirección del elevador:** esta la dirección en la que se dirige la cabina ARRIBA o ABAJO, esta entrada se obtiene del agente controlador de cabina.

#### ■ Salida

- **Tiempo de espera:** Valor estimado del tiempo de espera, se normaliza a un valor entre 0 y 1.

Como en el caso anterior esta red neuronal en entrenada de manera supervisada con ejemplos obtenidos a partir de simulaciones hechas usando el controlador convencional. Los parámetros de entrenamiento: coeficiente de aprendizaje de 0.6 y momentum de 0.1, se obtienen por experimentación. En la siguiente figura se gráfica la evolución en el aprendizaje.



**Figura 4.5:** Raíz del error cuadrático para el estimador Tiempo Espera

**Entrenamiento de las Redes Neuronales Artificiales** Para el entrenamiento SUPERVISADO se usó la técnica de BACKPROPAGATION, y consistió en minimizar el error a lo largo de 8000 iteraciones. Debido a que una tasa de aprendizaje muy pequeña haría lento el aprendizaje y una tasa muy alta haría oscilar mucho el error, el valor con mejor resultado fue usar una tasa de aprendizaje de 0.6 y de momentum de 0.1.

A las redes neuronales se les presentaron 7378 ejemplos, éstos se obtuvieron midiendo en el simulador cuanto duraba un pasajero esperando que el ascensor llegara a recogerlo (para estimar el tiempo de espera) y cuanto duraba este mismo pasajero desde que el ascensor lo recogía hasta que llegaba a su destino (para estimar el tiempo de viaje). Este tiempo se registraba en la base datos, se normalizaban las entradas y se le presentaba a la red neuronal. Se utilizó el framework JOONE [JOO].

El número de iteraciones, el valor de la tasa de aprendizaje y la configuración de la red neuronal son valores que se obtuvieron luego de varios ciclos de experimentación cambiando estos elementos hasta encontrar el valor que hacia converger el error a 0.

En las siguiente tablas se muestra un resumen de las múltiples configuraciones probadas y los resultados en términos del error cuadrático medio, para el predictor de tiempo de espera y el tiempo de viaje.



Entradas	# Neuronas Oculta	Tasa de Aprendizaje	Momentum	MSE
Sin normalizar	30	0.1	0.1	3.42
Normalizadas	30	0.1	0.1	0.64
Normalizadas	30	0.2	0.1	0.52
Normalizadas	40	0.6	0.1	0.32
Normalizadas	40	0.6	0.2	0.35
Normalizadas	50	0.6	0.2	0.25
Normalizadas	50	0.6	0.21	0.19

**Cuadro 4.4:** Entrenamiento ANN predictora tiempo de espera

Entradas	# Neuronas Oculta	Tasa de Aprendizaje	Momentum	MSE
Sin normalizar	30	0.1	0.1	2.53
Normalizadas	30	0.1	0.1	0.38
Normalizadas	30	0.2	0.1	0.27
Normalizadas	40	0.6	0.1	0.10
Normalizadas	40	0.6	0.2	0.11
Normalizadas	50	0.6	0.2	0.04
Normalizadas	50	0.6	0.21	0.01

**Cuadro 4.5:** Entrenamiento ANN predictora tiempo de viaje

## 4.4. Inferencia en el Agente Arbitro del Sistema

Determinar qué ascensor puede atender en una mejor medida una llamada es una decisión compleja. Está sujeta a muchas variables del ambiente que cambian en el tiempo y que tienen naturaleza estocástica. Por esta razón no es posible calcular por medio de un algoritmo de optimización la mejor opción de elevador para atender la llamada.

Se conoce por medio de estudios previos que algunas características hacen que los tiempos de espera y de viaje de los usuarios puedan ser reducidos [Bar03], por ejemplo la carga que contenga el ascensor, las paradas que éste deba hacer, área del piso destino y origen de la llamada, entre otros, aportando cada uno en diferente medida para resolver los objetivos de control. Éstos factores se pueden incorporar por medio de un conjunto de reglas tendientes a aumentar la eficiencia del algoritmo de control, pero las reglas son fragmentadas y difíciles de organizar [Y], así mismo la escogencia de las reglas más apropiadas para escenario de control es complejo. En resumidas cuentas es complicado incorporar adecuadamente éste conocimiento para ser usado por el software de control.

La lógica difusa se caracteriza por producir resultados exactos sobre datos imprecisos. En general cuando la complejidad del sistema es alta y la convergencia hacia la solución óptima presenta dificultades es posible utilizar métodos de aproximación basados en lógica difusa [Zad73]. Muchas aplicaciones de la lógica difusa para el control en problemas de optimización han sido usados en otros estudios [HCfL92].

En éste trabajo la lógica difusa es usada para describir el estado del sistema así como el conocimiento del experto. Las reglas difusas se alimentan de datos que pueden ser calculados y otros que simplemente son estimados estadísticamente o por medio de las redes neuronales antes mencionadas. Este tipo de controlador permite que la solución sea robusta y que el control no se vea afectado ante el ruido que puedan presentar las variables de control.

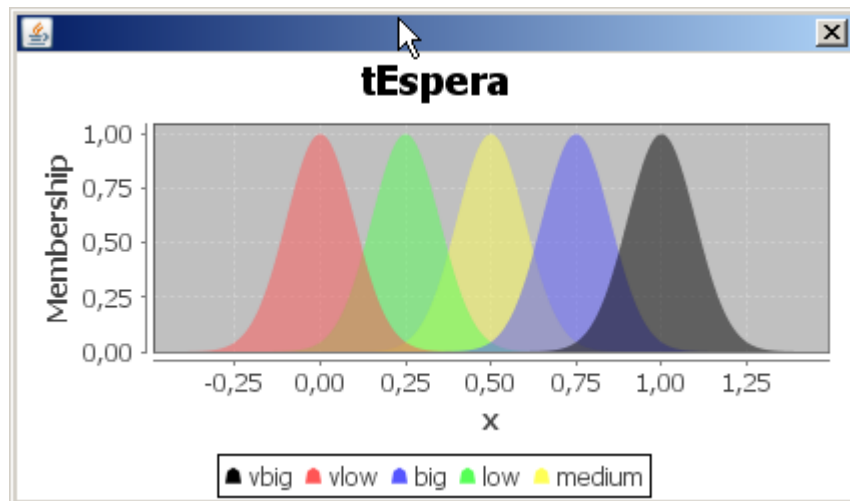
Los conjuntos de entrada se obtuvieron analizando que factores pueden determinar que una llamada sea atendida rápidamente o con una demora mayor, así mismo se incorporan conjuntos difusos con el fin de involucrar el tiempo que pueda tardar un pasajero dentro de un elevador y la energía que el sistema pueda consumir.

En la fase de desarrollo se probó usando otras entradas pero no tuvieron efecto sobre los objetivos de control. Lo que realmente tuvo un efecto importante sobre el controlador fue haber ponderado las reglas de inferencia para que aquellas que tuvieran una mayor participación en la eficiencia del sistema fuesen tenidas más en cuenta.

En los siguientes párrafos se presentan las entradas del sistema, las salidas y las reglas de inferencia con sus pesos asignados. En el desarrollo de este componente se usó la librería JFuzzyLogic [Cin].

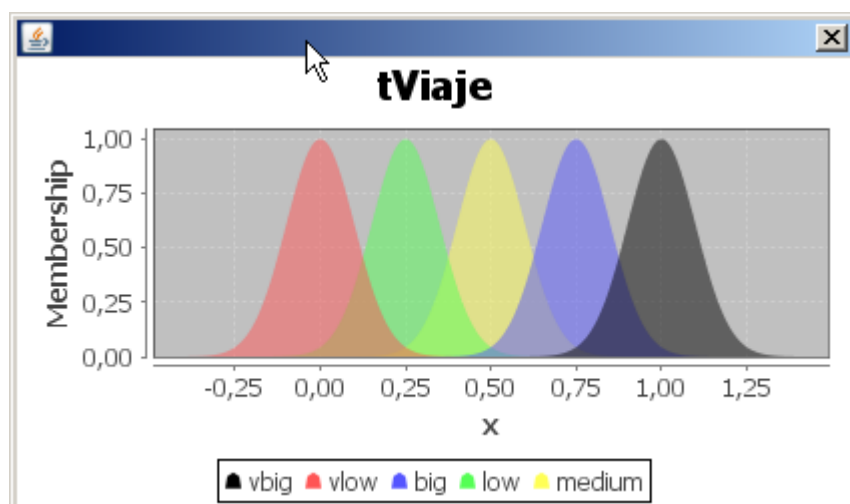
**Entradas Difusas Agente Obtener Ascensor Para Llamada** Las entradas para el motor de inferencia difuso son tomadas como conjuntos Gaussianos, y por cada una estas entradas se definen 5 conjuntos difusos.

- **Estimación Tiempo de Espera:** Representa la estimación del tiempo que requiere un ascensor para viajar desde su posición actual hasta el piso en el que se genera la llamada, este datos se obtiene del agente estimador tiempo de espera. Esta entrada está normalizada  $[0,1]$ .



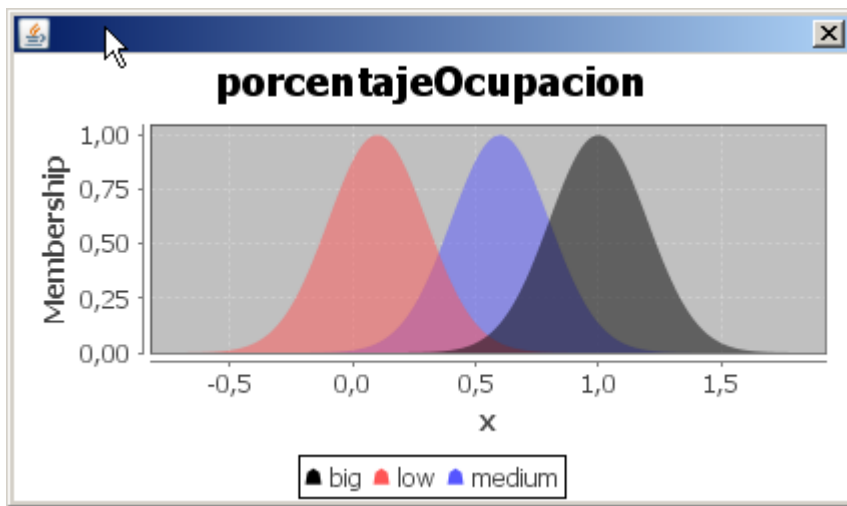
**Figura 4.6:** Conjuntos Difusos Tiempo de Espera

- **Estimación Tiempo de Viaje:** Representa la estimación del tiempo que requiere un pasajero para ser transportado de su piso origen a su piso destino. Esta entrada está normalizada  $[0,1]$ .



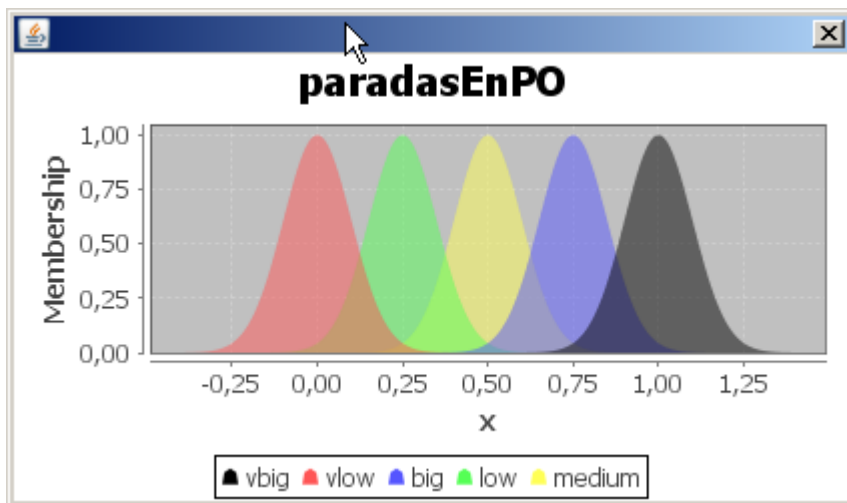
**Figura 4.7:** Conjuntos Difusos Tiempo de Viaje

- **Porcentaje de Ocupación del Elevador:** Porcentaje de ocupación de la cabina de ascensor, este dato se obtiene del agente Cabina de Ascensor. Esta entrada está normalizada  $[0,1]$ .



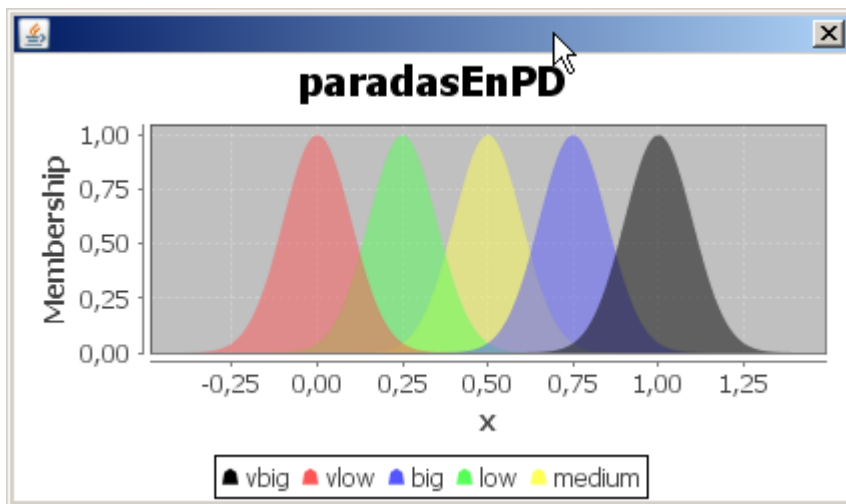
**Figura 4.8:** Conjuntos Difusos Porcentaje de Ocupación

- **Paradas en Piso Origen:** Determina que tantas llamadas tiene el ascensor asignadas para el piso origen de la llamada en cuestión. Esta entrada está normalizada  $[0,1]$ .



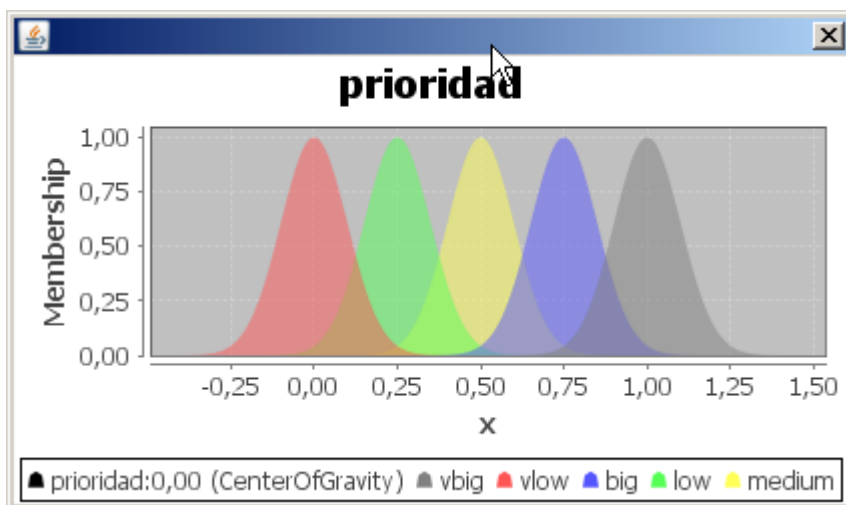
**Figura 4.9:** Conjuntos Difusos Paradas en Piso Destino

- **Paradas en Piso Destino:** Determina que tantas llamadas tiene el ascensor asignadas para el piso destino de la llamada en cuestión. Esta entrada está normalizada  $[0,1]$ .



**Figura 4.10:** Conjuntos Difusos Paradas en Piso Destino

**Salida Difusa Agente Obtener Ascensor Para Llamada** La salida del motor de inferencia difuso es la prioridad que tiene el ascensor para atender la llamada, esta prioridad puede ser muy alta, alta, media, baja, muy baja.



**Figura 4.11:** Salida Prioridad

**Reglas de Inferencia Difusas Agente Obtener Ascensor Para Llamada** Las reglas que describen el estado del sistema e incorporan el conocimiento del experto para éste caso son 23. En éstas reglas están plasmados los objetivos de control, cada una de estas reglas tiene un peso asociado que podría ser modificado por el agente de acuerdo al objetivo que tenga más importancia en el momento de la decisión.

Estas reglas se toman de acuerdo a los factores que tiene más importancia para cumplir con los objetivos de control.

Id	Regla de Inferencia	Peso
<b>R1</b>	Si “Estimación Tiempo de Espera” es MUY BAJO entonces la prioridad es MUY ALTA	0.6
<b>R2</b>	Si “Estimación Tiempo de Espera” es BAJO entonces la prioridad es ALTA	0.6
<b>R3</b>	Si “Estimación Tiempo de Espera” es MEDIO entonces la prioridad es MEDIA	0.6
<b>R4</b>	Si “Estimación Tiempo de Espera” es ALTO entonces la prioridad es BAJA	0.6
<b>R5</b>	Si “Estimación Tiempo de Espera” es MUY ALTO entonces la prioridad es MUY BAJA	0.6
<b>R6</b>	Si “Estimación Tiempo de Viaje” es MUY BAJO entonces la prioridad es MUY ALTA	0.5
<b>R7</b>	Si “Estimación Tiempo de Viaje” es BAJO entonces la prioridad es ALTA	0.5
<b>R8</b>	Si “Estimación Tiempo de Viaje” es MEDIO entonces la prioridad es MEDIA	0.5
<b>R9</b>	Si “Estimación Tiempo de Viaje” es ALTO entonces la prioridad es BAJA	0.5
<b>R10</b>	Si “Estimación Tiempo de Viaje” es MUY ALTO entonces la prioridad es MUY BAJA	0.5
<b>R11</b>	Si “Porcentaje de Ocupación” es BAJO entonces la prioridad es ALTA	0.3
<b>R12</b>	Si “Porcentaje de Ocupación” es MEDIO entonces la prioridad es MEDIA	0.3
<b>R13</b>	Si “Porcentaje de Ocupación” es ALTO entonces la prioridad es BAJA	0.3
<b>R14</b>	Si “Paradas en Piso Origen” es MUY BAJO entonces la prioridad es MUY BAJA	0.7
<b>R15</b>	Si “Paradas en Piso Origen” es BAJO entonces la prioridad es BAJA	0.7
<b>R16</b>	Si “Paradas en Piso Origen” es MEDIO entonces la prioridad es MEDIA	0.7
<b>R17</b>	Si “Paradas en Piso Origen” es ALTO entonces la prioridad es ALTA	0.7
<b>R18</b>	Si “Paradas en Piso Origen” es MUY ALTO entonces la prioridad es MUY ALTA	0.7
<b>R19</b>	Si “Paradas en Piso Destino” es MUY BAJO entonces la prioridad es MUY BAJA	0.7
<b>R20</b>	Si “Paradas en Piso Destino” es BAJO entonces la prioridad es BAJA	0.7
<b>R21</b>	Si “Paradas en Piso Destino” es MEDIO entonces la prioridad es MEDIA	0.7
<b>R22</b>	Si “Paradas en Piso Destino” es ALTO entonces la prioridad es ALTA	0.7
<b>R23</b>	Si “Paradas en Piso Destino” es MUY ALTO entonces la prioridad es MUY ALTA	0.7

Cuadro 4.6: Tabla reglas de inferencia

## 4.5. Integración Controlador Simulador

La integración entre el simulador el controlador basado en sistemas multiagentes e inteligencia artificial se realiza por medio una interfaz java. Ésta interfaz java expone a modo de contrato lo métodos que las clases que implementen ésta interfaz deben proveer así como los objetos que están visibles para la implementación. En la siguiente gráfica se observa el modelo de clases de lo expuesto.

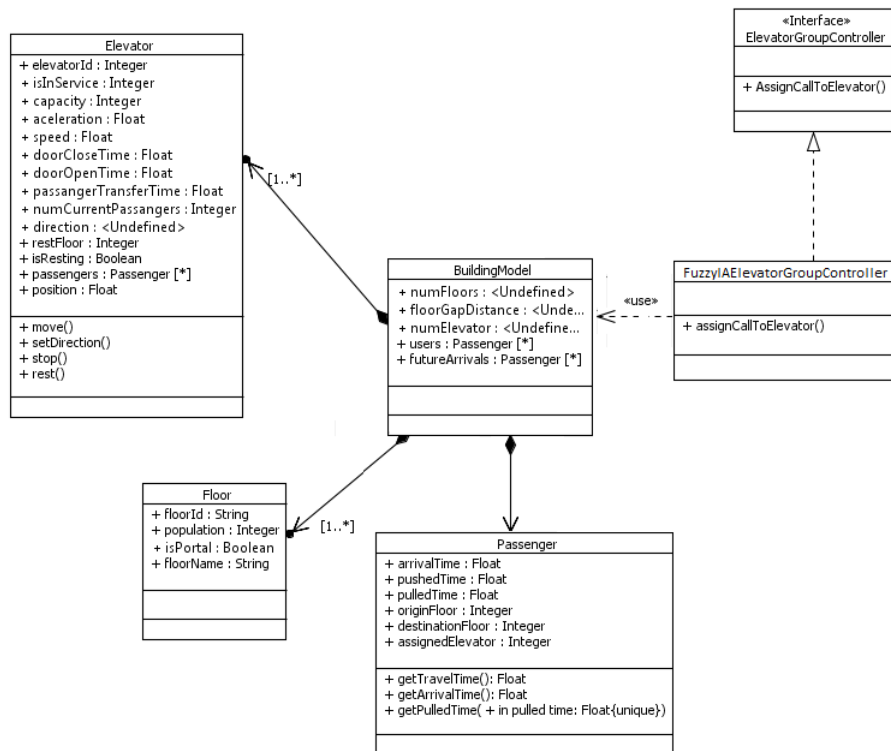


Figura 4.12: Modelo de Integración

Por lo tanto la implementación del simulador es agnóstica al controlador que se configure, solamente en tiempo de ejecución se conoce cuál es el controlador que se va a utilizar y éste podrá consultar las características del sistema en tiempo de simulación para tomar la decisión de asignación de llamada.

Ésta arquitectura distribuida y débilmente acoplada permite que el controlador pueda ser llevado a un ambiente real sin modificar en gran medida el código de la implementación. Se deja la siguiente figura para hacer más claridad entre la separación de lo que es SIMULADOR y CONTROLADOR.

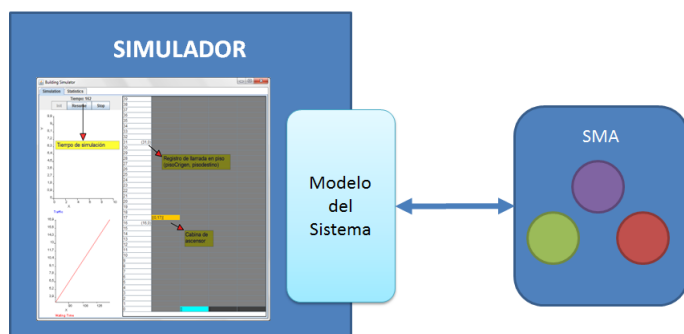


Figura 4.13: Arquitectura Integración

# 5 Resultados

## 5.1. Introducción

Para verificar el desempeño del controlador desarrollado se tomó una edificación real y los parámetros de ésta se ingresaron en la simulación, se usó el estudio de tráfico de la empresa finlandesa KONE [MLS01] en la torre de oficinas “Tour Europe”. Los detalles de cómo se ingresaron y el proceso de simulación que se muestra como ejemplo de presentan en el apéndice del libro.

La torre simulada tiene una altura de 40 pisos, 4 ascensores y la población de la edificación se estableció en 2000 personas, con 3 distribuciones de tráfico presentes (ENTRADA, SALIDA, ENTREPISOS) y discretizada la entrada de pasajeros en segmentos de tiempo de 300 segundos. Los pasajeros arriban siguiendo un proceso de Poisson [Kel00], como se explicó en el capítulo 3.

En la siguiente gráfica se encuentra discriminado el (a) tráfico de entrada , (b) tráfico de salida, (c) tráfico entre pisos, (d) tráfico total.

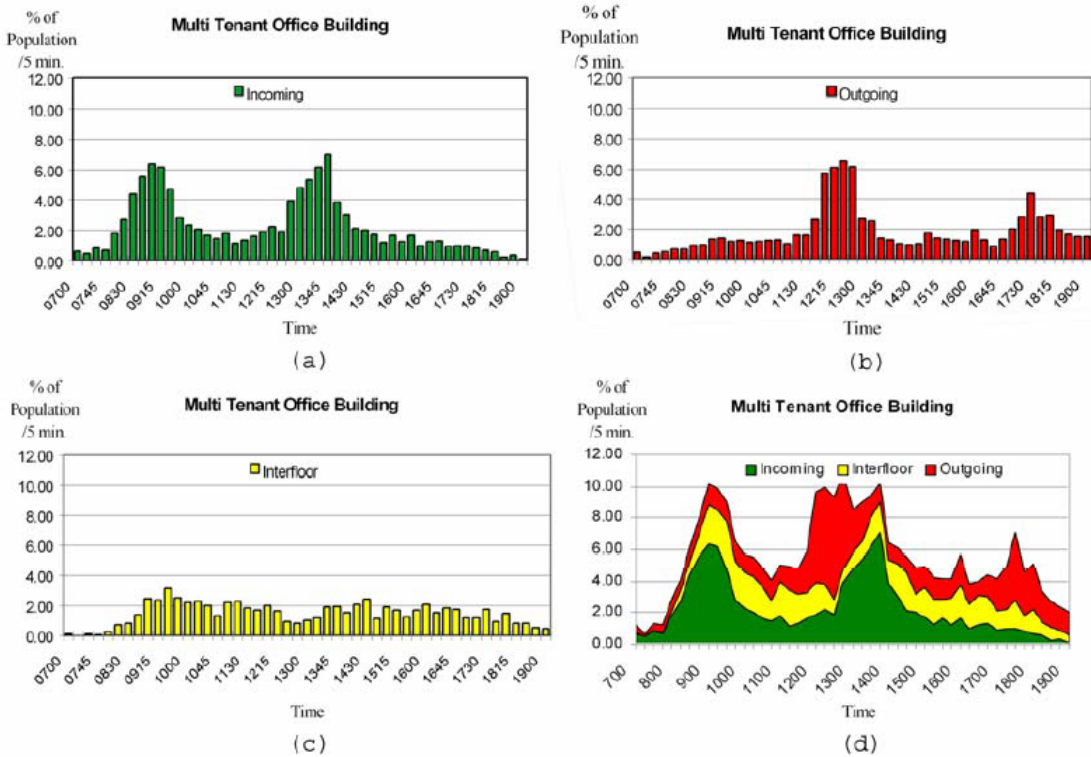


Figura 5.1: Plantilla de tráfico Tour Europe

Estas mismas gráficas se generaron en el simulador propuesto en dónde gráficamente se verifica la concordancia pero por rigurosidad se comprobará usando pruebas estadísticas apropiadas para el caso.



Figura 5.2: Plantilla de tráfico Tour Europe en el simulador propuesto

5.2. Validación del Simulador

La validación del simulador es muy importante para lo que se denomina “credibilidad en el modelo”. En éste apartado se demuestra que el modelo es confiable y que representa adecuadamente el comportamiento del sistema bajo estudio.

5.2.1. Validación del Generador de Tráfico

Es necesario validar que el simulador esté generando el tráfico de pasajeros basado en un proceso de Poisson. Para hacer esta validación se corrieron 100 simulaciones en las que se tomó el número de pasajeros generados en cada uno de los intervalos de tiempo medidos y se verificó si estos valores aleatorios siguen una distribución de Poisson. Fue necesario tomar un número grande de simulaciones para que la prueba de bondad de ajuste Chi-Cuadrado no incurriera en errores.

En la siguiente tabla se muestran el número de pasajeros generados por simulación. En la primera fila está la hora del día para la cual se van a generar los pasajeros y en segunda está el parámetro lamda de la distribución de Poisson.

En la tabla no se incluyen todos los segmentos del día, si no que se toman muestras cada hora de la cantidad de pasajeros generados, por lo tanto los datos a verificar son aquellos de las horas (7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19).



1		x (7 am)	x (8 am)	x (9 am)	x (10 am)	x (11 am)	x (12 pm)	x (1 pm)	x (2 pm)	x (3 pm)	x (4 pm)	x (5 pm)	x (6 pm)	x (7 pm)
2	Lamda	20	46	198	108	96	194	168	120	96	114	70	96	47
3	Sim 1	20	45	183	122	92	181	155	118	104	131	58	100	45
4	Sim 2	27	37	220	121	76	188	189	118	101	117	66	116	45
5	Sim 3	24	43	221	115	95	194	179	124	92	117	71	82	59
6	Sim 4	24	51	197	113	92	193	136	116	97	119	72	87	36
7	Sim 5	34	44	182	105	111	194	170	119	120	121	69	97	47
8	Sim 6	26	34	199	96	108	225	148	121	84	117	76	95	52
9	Sim 7	24	55	214	109	92	208	184	120	86	92	70	75	46
10	Sim 8	19	41	181	106	95	213	161	126	99	109	69	73	54
11	Sim 9	15	38	209	103	85	191	178	120	81	102	60	100	49
12	Sim 10	24	50	173	113	93	188	166	130	79	123	74	83	38
13	Sim 11	18	41	206	115	108	177	174	107	108	100	79	98	51
14	Sim 12	22	37	182	109	91	190	165	123	96	124	61	102	45
15	Sim 13	25	40	202	106	88	173	163	102	98	106	62	100	50
16	Sim 14	23	47	200	103	118	166	163	108	88	110	69	93	48
17	Sim 15	29	42	193	102	113	217	175	115	93	108	65	95	42
18	Sim 16	21	65	193	105	100	203	169	119	96	119	79	113	50
19	Sim 17	20	65	207	120	95	217	157	120	93	110	58	117	34
20	Sim 18	29	49	187	101	105	196	169	119	111	124	72	78	52
21	Sim 19	27	44	192	109	84	200	175	135	95	92	71	104	34
22	Sim 20	23	35	172	101	104	189	154	120	92	99	59	101	48
23	Sim 21	19	43	178	117	108	167	139	112	77	141	66	108	43
24	Sim 22	25	55	195	108	112	191	173	102	105	97	59	94	47

Figura 5.3: Muestras de generación de pasajeros

### 5.2.1.1. Prueba de bondad de ajuste Chi-Cuadrado $\chi^2$

El número de pasajeros generados en cada una de las 100 simulaciones en el mismo segmento de tiempo debe estar distribuido Poisson, para garantizar esto se aplica a cada grupo de datos la prueba estadística Chi-Cuadrado.

El primer paso para comprobar que el número de pasajeros generados sigue una distribución de Poisson, es generar la hipótesis nula y alternativa [DRA08].

- **Ho:** La cantidad de pasajeros que llegan al sistema durante intervalos de 15 minutos, sigue una distribución de Poisson.
- **Ha:** La cantidad de pasajeros que llegan al sistema durante intervalos de 15 minutos, no sigue una distribución de Poisson.

Rechazaremos la hipótesis nula en el caso que haya una probabilidad mayor al 5 % que los datos no se distribuyan Poisson, el margen de error tipo I se establece es 0.05.

Estas hipótesis se deben plantear para cada una de las pruebas de bondad de ajuste sobre cada uno de los lamdas usados para generar el tráfico, por lo tanto las hipótesis quedarían.

- **Ho:**  $X_i \sim Poisson(\lambda_i)$ ,  $\lambda_i = \dots = \lambda_n$
- **Ha:**  $X_i \sim Poisson(\lambda_i)$ ,  $\sum(\lambda_i - \bar{\lambda})^2 > 0,05$

Si existe concordancia perfecta entre las frecuencias observadas y las esperadas de la distribución chi-cuadrado el estadístico tomará un valor cercano a 0; por el contrario, si existe una gran discrepancia entre estas frecuencias el estadístico tomará un valor grande, en consecuencia, se rechazará la hipótesis nula si es mayor a 0.05.

En la siguiente imagen se comparan las frecuencia observadas y esperadas para demostrar que los datos se distribuyen de acuerdo a Poisson, para un valor de lamda igual a 20 con una muestra de 100 datos.

	A	B	C	D	E
1	Etiquetas	Frecuencias	Producto	Esperado	Chi2
11	10	0	0	0.29	2.9E-01
12	11	1	11	0.57	3.3E-01
13	12	1	12	1.01	8.7E-05
14	13	0	0	1.66	1.7E+00
15	14	6	84	2.52	4.8E+00
16	15	6	90	3.59	1.6E+00
17	16	2	32	4.78	1.6E+00
18	17	5	85	6.00	1.7E-01
19	18	10	180	7.11	1.2E+00
20	19	8	152	7.98	3.1E-05
21	20	7	140	8.52	2.7E-01
22	21	6	126	8.65	8.1E-01
23	22	4	88	8.39	2.3E+00
24	23	8	184	7.78	6.4E-03
25	24	11	264	6.91	2.4E+00
26	25	8	200	5.90	7.5E-01
27	26	3	78	4.84	7.0E-01
28	27	5	135	3.82	3.6E-01
29	28	2	56	2.91	2.9E-01
30	29	3	87	2.14	3.4E-01
31	30	0	0	1.52	1.5E+00
32	31	1	31	1.05	2.2E-03
33	32	2	64	0.70	2.4E+00
34	33	0	0	0.45	4.5E-01

Figura 5.4: Prueba chi-cuadrado en excel

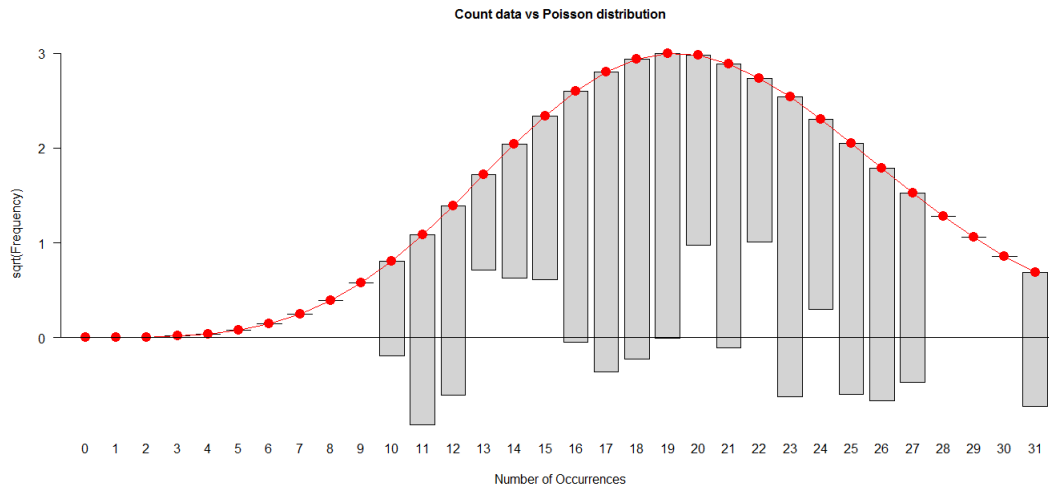
Finalmente debemos calcular la probabilidad de equivocarnos si rechazamos la hipótesis nula, este valor se conoce como P-Valor.

En la siguiente tabla se muestran los P-Valores para todos los intervalos de generación de pasajeros tomados en nuestra muestra. Como se puede observar la probabilidad de equivocarnos en la prueba es inferior en todos los casos al 5 %, por lo que se concluye con un alto grado de certeza que los datos se distribuyen Poisson. Los P-Valores fueron calculados usando el paquete estadístico R.

95	Sim 93	31	47	191	101	97	188	173	111	104	108	60	93	46
96	Sim 94	28	50	201	83	84	208	161	121	95	112	84	83	60
97	Sim 95	24	45	194	112	92	224	187	127	89	120	72	94	56
98	Sim 96	18	41	185	99	108	214	156	122	111	145	85	98	51
99	Sim 97	26	49	217	108	97	218	164	127	90	110	73	103	49
100	Sim 98	21	44	191	107	83	186	184	126	93	107	51	96	52
101	Sim 99	24	41	200	120	84	189	164	150	106	111	68	85	48
102	Sim 100	14	48	204	88	98	199	157	121	109	127	74	81	40
103	P-Valor	0.030	0.020	0.010	0.005	0.004	0.011	0.010	0.021	0.011	0.001	0.012	0.002	0.030

Figura 5.5: Prueba chi-cuadrado en excel

Adicionalmente se puede observar gráficamente que en el histograma las frecuencias observadas no difieren mucho de las esperadas para la distribución de Poisson, esta gráfica se obtuvo usando el software estadístico R.



**Figura 5.6:** Prueba chi-cuadrado en R

### 5.3. Protocolo de Experimentación

Se ha observado que el control convencional para la asignación de cabinas de ascensor no tiene en cuenta los objetivos de control inherentes en el problema de tráfico vertical “*Reducir tiempo de espera, tiempo de servicio y energía consumida*”, si no que da prioridad a la cabina de ascensor que se encuentre más cerca para asistir la llamada.

Se desea verificar que el controlador propuesto presenta un mayor rendimiento en cuanto a los objetivos de control respecto al control convencional.

#### 5.3.0.2. Materiales

##### Variables Independientes

- **Controlador para grupo de elevadores**
  - Controlador convencional orientado por la distancia de la cabina.
  - Controlador basado en inteligencia artificial, orientado a cumplir los 3 objetivos de control del tráfico vertical.
- **Número de pisos de la edificación**
  - Dominio { 40, 50, 60, 70 80, 90, 100} pisos.
- **Número de ascensores del grupo de elevadores a controlar.**
  - Dominio {4, 6, 8, 10, 12, 14, 16} elevadores.
- **Capacidad de cada uno de los elevadores.**
  - Dominio { 8, 10, 12, 14, 16, 18 , 20 } personas.
- **Población de la edificación.**
  - Dominio {2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000} personas.

### Variables Dependientes

- **Tiempo de espera promedio:** es la media aritmética del tiempo que debe esperar un pasajero para ser atendido por una cabina, ésta variable se debe reducir.
- **Tiempo de servicio promedio:** es la media aritmética del tiempo que tarda un pasajero desde que se sube a la cabina hasta que llega al piso destino, ésta variable se debe reducir.
- **Energía consumida promedio:** es la distancia medida en pisos que deben recorrer todas las cabinas de ascensor, entre más pisos (distancia) recorra más energía consume el sistema, por lo tanto se desea reducir esta variable.

### Variables Intervinientes

- **Tiempo de procesamiento:** debido a los cálculos que deben realizar cada uno de los controladores, se está incluyendo un tiempo adicional de procesamiento en el tiempo de la simulación. Para eliminar el impacto se maneja un cronómetro de simulación independiente que ignora el tiempo de procesamiento. Por lo tanto esta latencia no afecta el resultado de la simulación.

#### 5.3.0.3. Métodos

Se harán 4 grupos de simulaciones variando las variables independientes. El cambio en las variables se hará de manera gradual para verificar el comportamiento de los controladores en todos estos escenarios.

Las variables dependientes se medirán para comprobar la eficiencia de los controladores y se detallarán estos resultados en una tabla comparativa por cada escenario.

Las entradas que no varían durante las simulaciones se detallan en la siguiente tabla de constantes.

Constante	Valor
Velocidad cabina de ascensor	1 m/s
Tiempo cabina abrir puerta	1 seg
Tiempo cabina cerrar puerta	1 segundo
Tiempo transferencia de pasajeros	1 segundo x pasajero
Altura entre pisos	2 mts
Modelo arribo de pasajeros	Poisson
Factor de aceleración de la simulación	100X (1 segundo = 10 ms en simulación)

**Cuadro 5.1:** Constantes de la simulación

#### Escenario 1 *Variando el número de pisos.*

Se correrán 14 simulaciones variando el número de pisos de la edificación. Se parte de 40 pisos como base y se llegará hasta los 100 pisos. Se aumentará la variable independiente número de pisos de 10 en 10 y se medirán las variables dependientes para saber como afecta el desempeño de cada controlador al modificar el número de pisos.

Los valores de las demás variables que no se modifican en las 14 simulaciones se detallan en la siguiente tabla.

Constante	Valor
Número de cabinas	4
Capacidad de la cabina	8 personas
Población de la edificación	2000 personas -igualmente distribuidas en todos los pisos-

**Cuadro 5.2:** Constantes de la simulación

Los resultados de las 14 simulaciones son los siguientes. Como se puede observar hay una mayor eficiencia en todos los objetivos de control del elevador propuesto sobre el sistema tradicional.

Al parecer el solo aumentar el número de pisos sin tocar la población no cambia mucho los resultados obtenidos, es quizás en el tiempo de espera en dónde la modificación de ésta variable tiene mayor efecto.

Pisos	WT (Conv)	WT (CI)	Dif	ST (Conv)	ST (CI)	Dif	E (Conv)	E (CI)	Dif
40	140 seg	122 seg	13 %	60 seg	49 seg	18 %	41656	37112	10 %
50	154 seg	129 seg	16 %	75 seg	62 seg	17 %	42895	37825	11 %
60	220 seg	169 seg	22 %	80 seg	69 seg	14 %	43125	38142	11 %
70	253 seg	194 seg	21 %	97 seg	82 seg	15 %	43519	38717	11 %
80	274 seg	216 seg	22 %	115 seg	101 seg	13 %	43964	38156	10 %
90	293 seg	234 seg	21 %	127 seg	113 seg	11 %	44525	39289	11 %
100	314 seg	245 seg	22 %	133 seg	120 seg	10 %	45969	39946	13 %

Cuadro 5.3: Simulación escenario 1

### Escenario 2 Variando el número máximo de pasajeros por cabina de ascensor.

Se llevó a cabo la simulación modificando la capacidad de las cabinas de ascensor. Se toma como valor inicial 8 personas, se aumentó el número de pasajeros hasta llegar a 20.

Constante	Valor
Pisos de la edificación	40
Número de cabinas	4
Población de la edificación	2000 personas -igualmente distribuidas en todos los pisos-

Cuadro 5.4: Constantes de la simulación

Nuevamente se puede observar hay una mayor eficiencia en todos los objetivos de control del elevador propuesto sobre el sistema tradicional.

Al modificar el número máximo de personas que pueden viajar en cada cabina de ascensor la variable que más impacto favorable tiene es la energía consumida. Esto se puede interpretar como que el sistema inteligente agrupa mejor las llamadas haciendo que las cabinas viajen en conjunto una menor distancia que con el sistema tradicional. Los resultados de las demás variables son un poco inferiores a los obtenidos en el escenario anterior, esto es debido a que las cabinas al tener mayor cantidad de pasajeros deben hacer un número mayor de paradas intermedias para servir cada pasajero.

Capacidad	WT (Conv)	WT (CI)	Dif	ST (Conv)	ST (CI)	Dif	E (Conv)	E (CI)	Dif
8	142 seg	121 seg	13 %	59 seg	47 seg	18 %	43519	38717	11 %
10	168 seg	149 seg	11 %	65 seg	54 seg	16 %	41026	36102	12 %
12	187 seg	159 seg	14 %	71 seg	60 seg	15 %	38989	33140	15 %
14	185 seg	161 seg	13 %	70 seg	62 seg	11 %	37895	31452	17 %
16	188 seg	165 seg	12 %	69 seg	61 seg	8 %	35789	28273	21 %
18	191 seg	170 seg	11 %	73 seg	70 seg	4 %	34899	25476	27 %
20	197 seg	177 seg	10 %	74 seg	72 seg	2 %	33627	22420	33 %

Cuadro 5.5: Simulación escenario 2

### Escenario 3 Variando la población de la edificación.

Se toma otro escenario en donde la población de la edificación aumente. Esto indica que el número de pasajeros a mover por el sistema de transporte vertical va a ser mayor.

Se aumenta la población en 500 pasajeros y se hacen 14 simulaciones partiendo de una población base de 2000 usuarios.

Constante	Valor
Pisos de la edificación	40
Número de cabinas	4
Capacidad de la cabina	8 personas

**Cuadro 5.6:** Constantes de la simulación

Los resultados de las 14 simulaciones son los siguientes. El mayor número de pasajeros según los resultados no genera un mejor comportamiento en el controlador inteligente, por el contrario los tiempo de espera y servicio suben considerablemente en los dos controladores pero de manera proporcional, lo que origina que los porcentajes de eficiencia se mantengan igual que con escenarios anteriores.

Este comportamiento se debe a que la configuración de la edificación en cuento a pisos, ascensores está diseñada para esta población. Si aumenta la población el número de cabinas y la capacidad de éstas deberían aumentar. En el último escenario se va a tratar este tipo de configuración, con un número mayor de pasajeros y una configuración del sistema más adecuada para atender la creciente demanda.

Población	WT (Conv)	WT (CI)	Dif	ST (Conv)	ST (CI)	Dif	E (Conv)	E (CI)	Dif
2000	142 seg	121 seg	13 %	59 seg	47 seg	18 %	40719	38717	11 %
2500	178 seg	158 seg	11 %	64 seg	53 seg	17 %	39852	38926	11 %
3000	186 seg	173 seg	10 %	69 seg	57 seg	13 %	39993	35073	12 %
3500	203 seg	181 seg	10 %	72 seg	61 seg	13 %	43793	38175	12 %
4000	207 seg	185 seg	11 %	78 seg	65 seg	16 %	45653	40055	12 %
4500	253 seg	215 seg	11 %	86 seg	75 seg	16 %	46153	39655	13 %
5000	323 seg	286 seg	13 %	99 seg	91 seg	8 %	47015	41697	11 %

**Cuadro 5.7:** Simulación escenario 3

#### Escenario 4 *Variando la cantidad de cabinas de elevador y la población.*

El mayor número de cabinas de ascensor para atender los pasajeros y el aumento de la población, son condiciones que favorecen al controlador inteligente. Se observa un 30 % de mejora en el tiempo de espera de pasajeros, un 20 % en el tiempo de servicio, y el consumo de energía también se reduce en un 26 %.

Esto se debe a que el controlador inteligente al tener mayor cantidad de llamadas puede agrupar las mismas de una mejor manera que el convencional y al tener varias cabinas disponibles las opciones de optimización también mejoran considerablemente. Una mayor demanda y un mayor número de cabinas son condiciones apropiadas para que la optimización en el control inteligente sea más acertada.

Constante	Valor
Pisos de la edificación	60
Capacidad de la cabina	10 personas

**Cuadro 5.8:** Constantes de la simulación

Cabinas	Población	WT (Conv)	WT (CI)	Dif	ST (Conv)	ST (CI)	Dif	E (Conv)	E (CI)	Dif
4	2000	142 seg	121 seg	13 %	59 seg	47 seg	18 %	40719	36234	11 %
8	3000	178 seg	145 seg	19 %	97 seg	81 seg	17 %	45852	38975	15 %
10	4000	259 seg	188 seg	27 %	118 seg	103 seg	13 %	51768	41932	19 %
12	5000	304 seg	212 seg	30 %	121 seg	96 seg	20 %	54159	40077	26 %
14	6000	301 seg	185 seg	28 %	130 seg	109 seg	18 %	58156	45055	22 %
16	7000	357 seg	255 seg	29 %	148 seg	119 seg	19 %	58723	45803	22 %
18	8000	370 seg	273 seg	27 %	154 seg	124 seg	20 %	59504	44697	25 %

Cuadro 5.9: Simulación escenario 4

#### 5.3.0.4. Experimentación Numérica

Se presenta a continuación una experimentación numérica para ver didácticamente cómo funciona el sistema de inferencia en el controlador inteligente y su comparación con el controlador convencional. Se recuerda brevemente el mecanismo de inferencia del controlador propuesta.

Se genera una nueva llamada en el sistema. Esta nueva llamada es procesada por el AGENTE ARBITRO DEL SISTEMA que escoge entre los ascensores que compiten, aquel que pueda prestar un mejor servicio. Esta decisión la toma con base en 5 criterios de decisión que son para él las entradas del motor de inferencia difuso. Recordemos brevemente las entradas.

1. **Estimación del tiempo de espera (TE):** este valor es entregado por el agente estimador W, él cual cuenta con una red neuronal ya entrenada que predice cuando se demorará en llegar el ascensor hasta el piso en donde aguarda el usuario.
2. **Estimación del tiempo de viaje (TV):** este valor es pronosticado por el agente estimador S, el cual usa una red neuronal entrenada para determinar cuando tiempo puede tardar un pasajero en llegar desde su piso origen hasta su piso destino.
3. **Porcentaje de ocupación del elevador (%O):** calculo del número de pasajeros sobre la capacidad del elevador.
4. **Paradas piso origen (PO):** si el ascensor tiene paradas en el piso origen del pasajero, tiene más posibilidad de atender la llamada.
5. **Paradas piso destino (PD):** si el ascensor tiene paradas en el piso destino del pasajero, tiene más posibilidad de atender la llamada.

Todas las entradas son normalizadas a un valor entre  $[0,1]$ . A continuación se presentan 2 ejemplo reales.

**Ejemplo 1** En el siguiente ejemplo se genera una llamada desde el piso 6 hasta el piso 12. El elevador 1 (transporta 1 pasajero) se encuentra en el piso 2 y tiene una parada en el piso 6. El elevador 2 (transporta 1 pasajero) está en el piso 5 y tiene una parada en el piso 17. El elevador 3 (transporta 2 pasajeros) está en el piso 2 y se dirige al piso 0. Veamos como procedería el agente asignador, usando el mecanismo tradicional y la lógica de control basada en redes neuronales y lógica difusa.

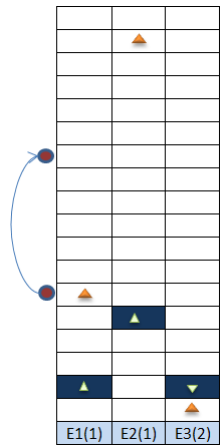
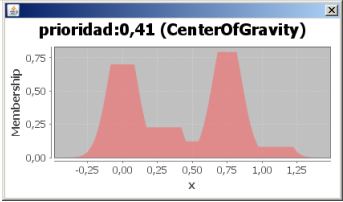
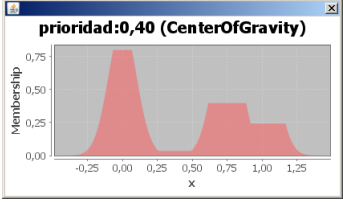
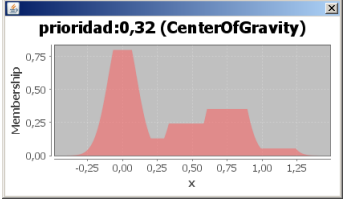


Figura 5.7: Ejemplo 1

- El mecanismo de decisión convencional le asignaría la llamada al elevador 2, debido a que se encuentra más cerca de la llamada.
- El mecanismo de decisión inteligente, tendría estos cálculos, por cada uno de los elevadores. Como se puede ver en la tabla, el elevador 1 tiene mayor prioridad a la hora de competir por la llamada, esto debido a que al evaluar la regla R16 que tiene que ver con las llamadas del elevador en el piso origen de la llamada tiene un valor superior a las demás evaluaciones. En este ejemplo queda claro que la lógica de control inteligente tiene mayor beneficio en términos de ahorro de energía porque está dejando de hacer una parada adicional.

	TE	TV	%O	PO	PD	Prioridad
Elevador 1	0.3	0.2	0.125	0.2	0	
Elevador 2	0.1	0.2	0.125	0	0	
Elevador 3	0.6	0.2	0.25	0	0	

**Ejemplo 2** En el siguiente ejemplo se genera una llamada desde el piso 11 hasta el piso 17. El elevador 1 (transporta 2 pasajero) se encuentra en el piso 6 y tiene una parada en el piso 17. El elevador 2 (transporta 3 pasajeros) está en el piso 9 y tiene una parada en el piso 14. El elevador 3 (transporta 4 pasajeros) está en el piso 6 y tiene una parada en el piso 17. Veamos como procedería el agente asignador en los casos.



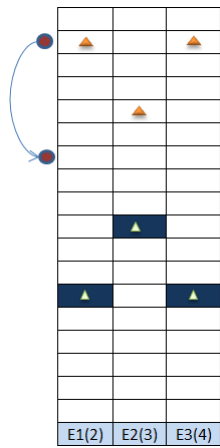
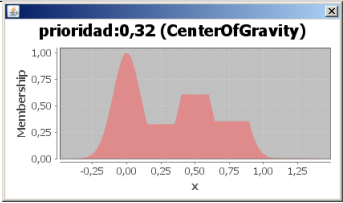
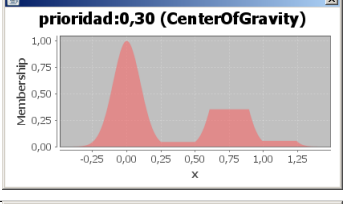
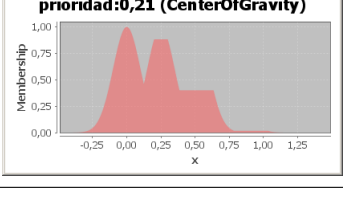


Figura 5.8: Ejemplo 2

- El mecanismo de decisión convencional le asignaría la llamada al elevador 2, debido a que se encuentra más cerca.
- El mecanismo de decisión inteligente, haría estos cálculos por cada elevador. Como se puede ver en la tabla, el elevador 1 tiene mayor prioridad a la hora de competir por la llamada. Se presenta en este caso un hecho de empate en cuando a la mayoría de las características, se podría pensar que tanto el elevador 1 como el 3 tienen las mismas posibilidades. Pero la regla 13 está hablando del porcentaje de ocupación y ya que el elevador 3 tiene más pasajeros, la evaluación de la regla permite el elevador 1 que está menos ocupado se quede con la llamada.

	TE	TV	%O	PO	PD	Prioridad
Elevador 1	0.6	0.3	0.125	0.2	0	
Elevador 2	0.2	0.2	0.25	0	0	
Elevador 3	0.6	0.3	0.5	0.2	0	



## 6 Conclusiones y Trabajo Futuro

### 6.1. Conclusiones

En éste trabajo de grado se presenta un simulador parametrizable que puede representar cualquier tipo de edificación y cualquier patrón de tráfico. Se comprobó rigurosamente la confiabilidad en el modelo simulado.

Se presentó un controlador basado en SMA e Inteligencia Artificial, demostrando que con el uso de técnicas inteligentes en el problema de asignación de tráfico en edificaciones de gran altura es posible mejorar el desempeño en el control para grupo de elevadores. En promedio después de correr la simulación alrededor de 68 veces variando los parámetros se observa una mejora en promedio del tiempo de espera 17 %, tiempo de viaje 14 % y energía consumida 16 %.

La combinación de técnicas como: redes neuronales para la predicción de variables con bastante incertidumbre y lógica difusa para combinar objetivos de control así como para priorizar estos mismos, hacen que los modelos de control híbridos para este tipo de problemas tenga un gran potencial.

El simulador permitirá a los investigadores centrarse en resolver el problema de asignación de llamadas, un problema que debido a su naturaleza dinámica es candidata a tratarse con técnicas de inteligencia computacional.

### 6.2. Trabajo Futuro

El simulador puede extenderse para usarlo en tareas de planificación de edificaciones gran altura, para determinar qué configuración de elevadores se debe tener (número de éstos, velocidad, capacidad, arquitectura, etc) y también para medir tiempos de evacuación, simulación de emergencias, etc.

El controlador desarrollado puede ser mejorado optimizando los parámetros de los conjuntos difusos, así como los pesos de las reglas aplicadas. Este algoritmo de optimización permitiría alcanzar un mejor resultado en cuento a la eficiencia del controlador de acuerdo a los objetivos trazados.



## 7 Apendice

### 7.1. Definiciones Principales

Se presentan los conceptos principales que serán usados a lo largo del libro, se recogen los conceptos que pueden ser interpretados ambiguamente.

- Tráfico vertical: Se entiende por tráfico en una edificación; el movimiento o tránsito de personas dentro del edificio, este tráfico tiene dos componentes tasa de arribo y probabilidad de destino.
- Tiempo de espera: es el tiempo comprendido entre la generación de la llamada de elevador y el arribo de este al piso origen de la llamada.
- Tiempo de viaje: es el tiempo comprendido desde que el pasajero entra al elevador hasta que llega a su piso destino.
- Tiempo total: es el tiempo que se comprende desde arribo del usuario al sistema hasta la llegada de este al piso destino, es la suma del tiempo de espera y el tiempo de viaje, es también llamado tiempo de servicio [Pow92] o tiempo a destino [Nak94].
- Tiempo de retorno de viaje (round trip time): Es el tiempo comprendido desde que un elevador recoge pasajeros en el primer piso (lobby), lleva los pasajeros a los pisos superiores y regresa a la primera planta (lobby) para volver a servir a los nuevos pasajeros.
- Capacidad del transporte del sistema: es el número de pasajeros que un grupo de elevadores puede transportar en una fracción de tiempo de cinco minutos.
- Patrón de tráfico: es la caracterización del comportamiento estocástico que se presenta en el arribo de pasajeros al sistema. Para este trabajo se consideran principalmente cuatro patrones: subida -uppeak-, entre pisos -interfloor-, bajada -downpeak-.

## 7.2. Tomas de Pantalla Simulador

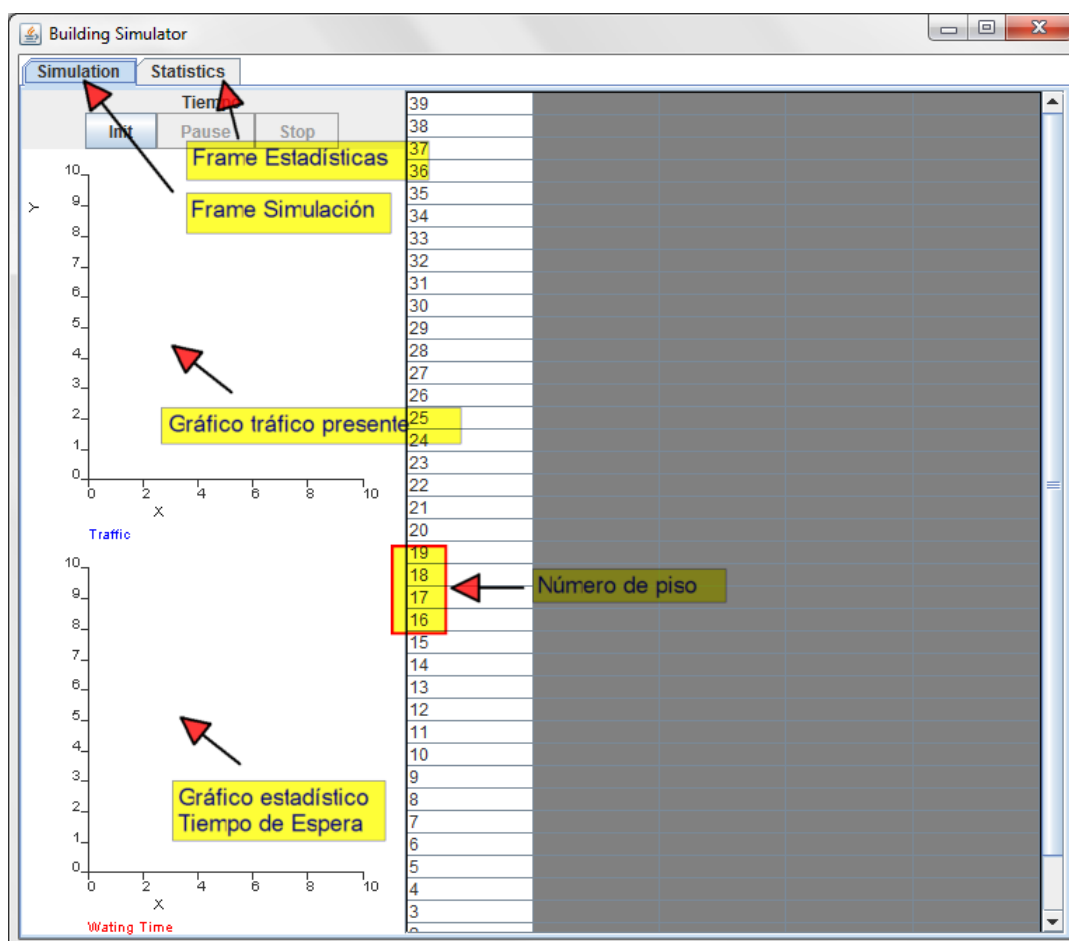


Figure 7.1: Simulador

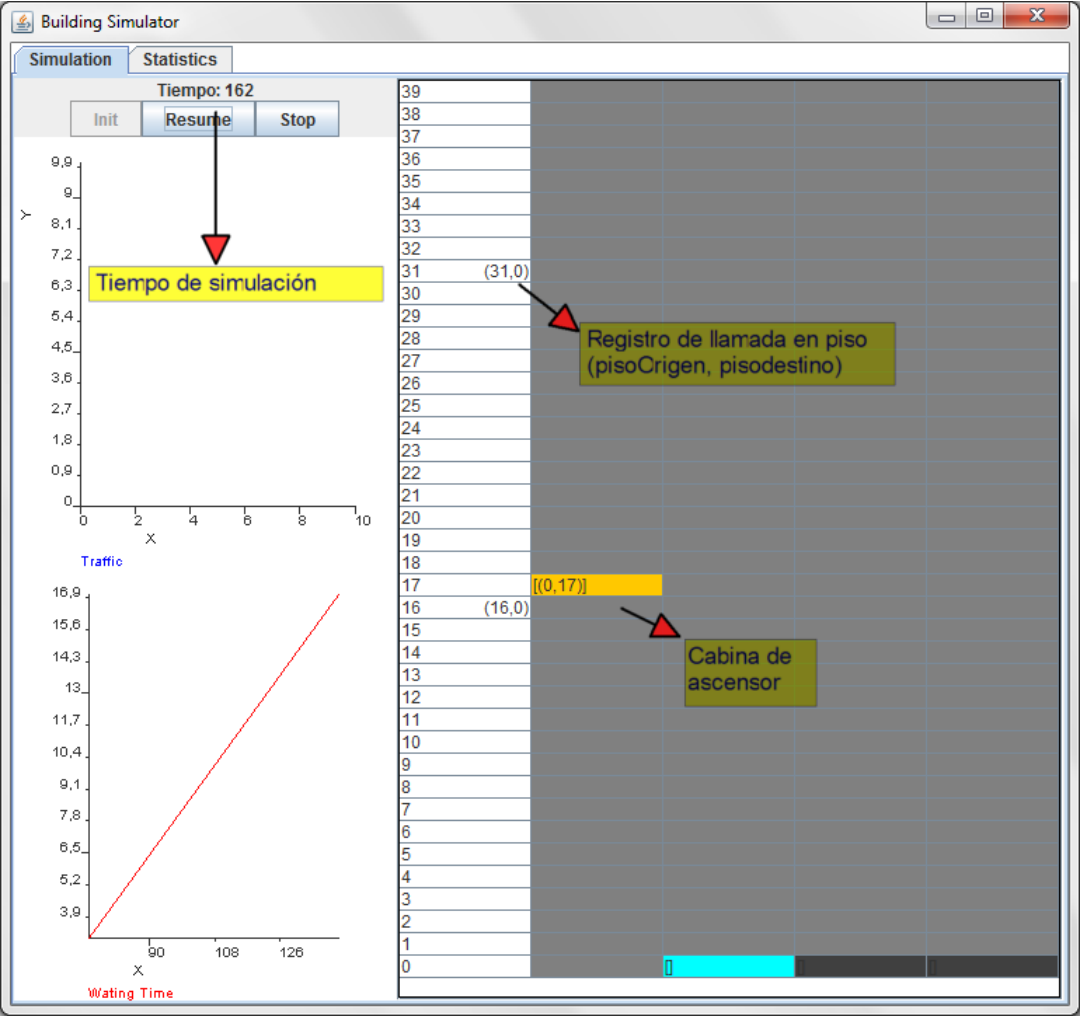


Figure 7.2: Simulador

**Figure 7.3:** Simulador



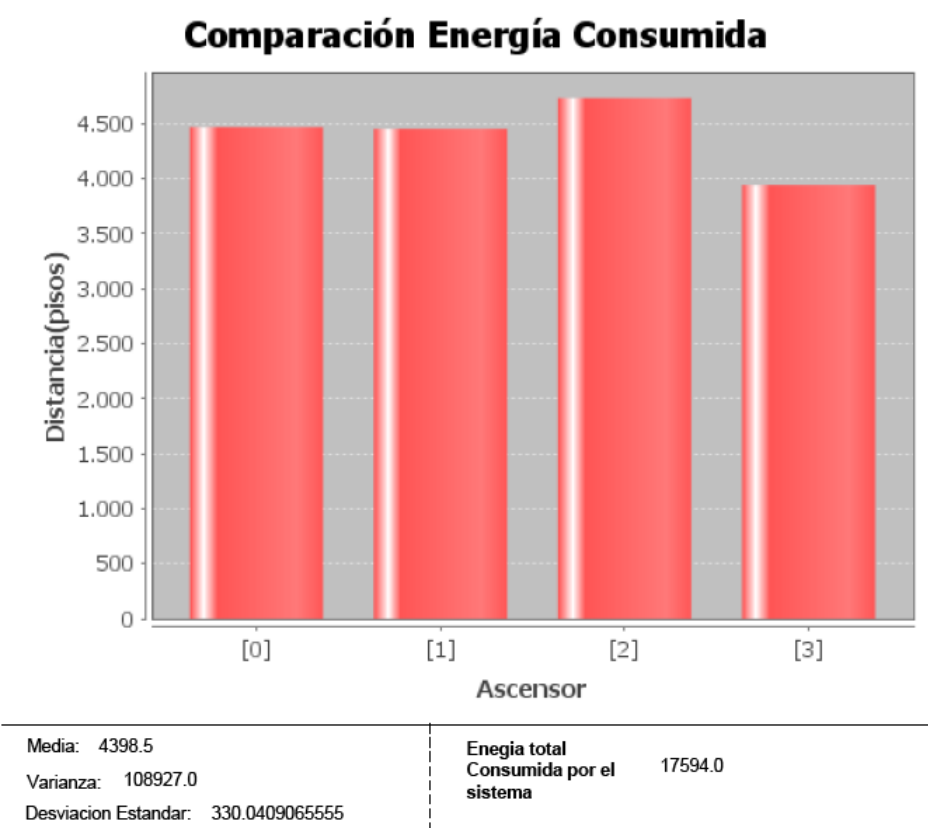


Figure 7.4: Reporte PDF energía consumida

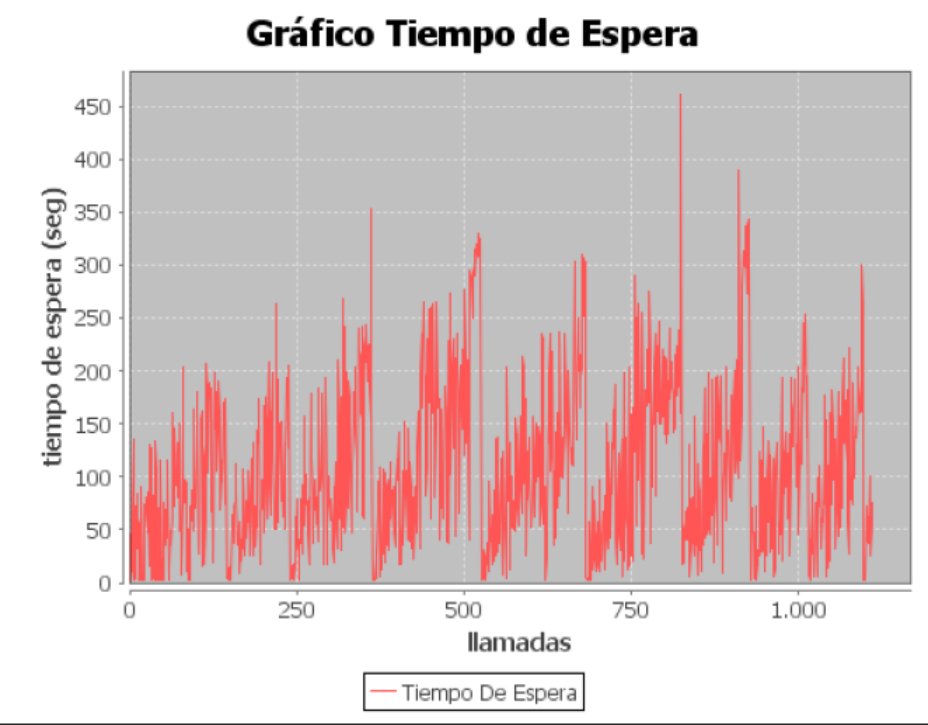
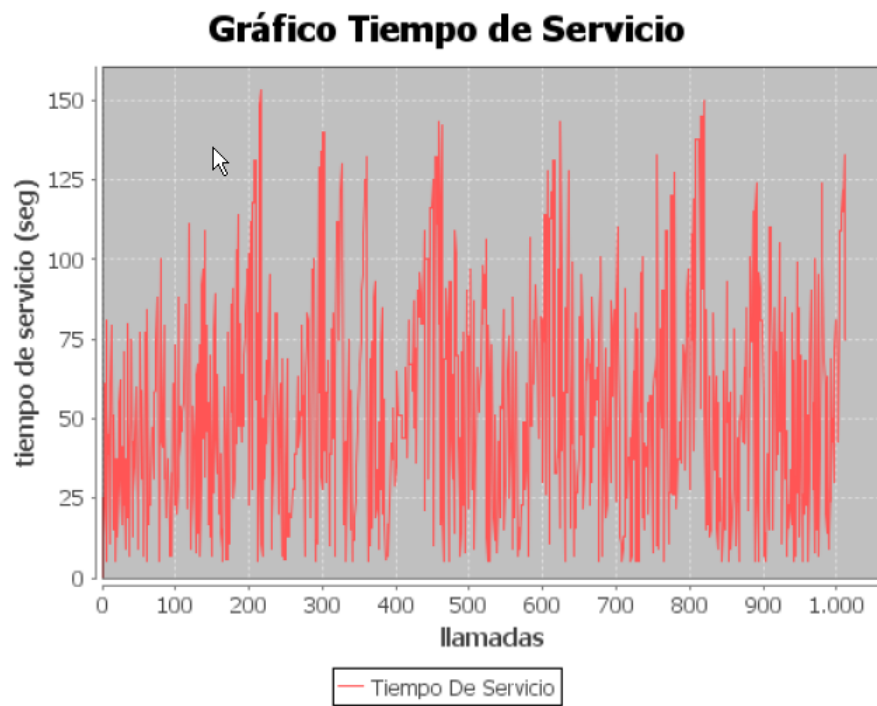


Figure 7.5: Reporte PDF Tiempo de Espera



Media: 53.82231

Varianza: 1168.9875

Desviacion Estandar: 34.19046

**Figure 7.6:** Reporte Tiempo de Servicio

# Bibliografía

- [Bar03] G.C. Barney. *Elevator Traffic Handbook: Theory and Practice*. Spon Press, 2003.
- [Bra00] B. Baumgartner Brandstatter. Particle swarm optimization mass-spring system analogon. *IEEE Transaction*, 38: 997–1000, 2000.
- [Cal03] Manuel Hernández Calviño. Aclarando la lógica borrosa (fuzzy logic). *Revista Cubana de Física*, 20, 2003.
- [Cin] Pablo Cingolani. A robust and flexible fuzzy-logic inference system language implementation.
- [COU11] NATIONAL SAFETY COUNCIL. Evacuation systems for high-rise buildings. *NATIONAL SAFETY COUNCIL*, 2011.
- [Cri98] A.G. Crites, R.H. y Barto. Improving elevator performance using reinforcement learning. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 1998.
- [DRA08] Dennis J. Sweeney David Ray Anderson. *Estadística para administración y economía*. CENGAGE Learning, 2008.
- [Dri96] Hellendoorn Driankov. *An Introduction to Fuzzy Control (context)*. Springer-Verlag, 1996.
- [DRI00] Jacinto Martín David Rios Insua, Sixto Rios Insua. *Simulación Métodos y Aplicaciones*. AlfaOmega, 2000.
- [EMP12] EMPORIS. World’s tallest buildings - top 200, 2012.
- [Gra93] Terasvirta T. Granger, C.W.J. Modelling nonlinear economic relationships. *Oxford University Press*, 1993.
- [Gu12] Yanwu Gu. Multi-objective optimization of multi-agent elevator group control system based on real-time particle swarm optimization algorithm. *Scientific Research*, 2012.
- [GZ97] Michael Y. Hu Guoqiang Zhang, B. Eddy Patuwo. Forecasting with artificial neural networks. *ELSEVIER*, 1997.
- [Hak03] Henri Hakonen. Simulation of building traffic and evacuation by elevators. *Helsinki University of Technology*, 2003.
- [HCfL92] M. Mizumoto H. Chen and Y. fel Ling. Automatic control of sewerage pumpstation by using fuzzy controls and neural networks. *Fuzzy Logic & Neural Networks*, 1992.
- [HD99] Rambau J. Hauptmeier D., Krumke. The online dial-a-ride problem under reasonable load. *Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin*, 1999.
- [HH08] Marja-Liisa Siikonen Henri Hakonen. Elevator traffic simulation procedure. *International Congress on Vertical Transportation*, 2008.
- [HMHL04] Aiyong Rong Henri M. Hakonen and Risto Lahdelma. Multiobjective optimization in elevator group control. *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, 2004.
- [Imr00] G.C. Imrak, E. y Barney. Application of neural networks on traffic control. *Lift Report*, 2000.
- [J00] Banks J. *Discrete-Event System Simulation*. Prentice Hall, 2000.
- [JLZ10] Xin Wang Weize Wang Jian Liu, Chengdong WU and Ting Zhang. A hybrid control for elevator group system. *Third International Workshop on Advanced Computational Intelligence*, 2010.

- [JOO] JOONE. an object oriented neural engine.
- [Kel00] Averill M. Law David Kelton. *Simulation Modeling And Analysis*. McGraw Hill, 2000.
- [L.97] Siikonen M. L. Elevator group control with artificial intelligence. *Helsinki University of Technology, Systems Analysis Laboratory, Research Reports*, 1997.
- [L.98] Siikonen M. L. Planning and control models for elevators in high-rise buildings. *Doctoral thesis, Helsinki University of Technology*, 1998.
- [LD] Yuehui Ji. Liqian Dou, Qun Zong. A mixed robust optimization and multi-agent coordination method for elevator group control scheduling. *Tianjin University*.
- [LJ01] Cortés P. Larrañeta J. Optimización dinámica en sistemas de tráfico vertical. *AICIA Technical Report*, 2001.
- [Miy88] Irie Miyake. Capabilities of three-layered perceptrons. *Proceedings of the IEEE International Conference on neural networks*, 1988.
- [MLdZCPSSdP96] A. Miravete, E. Larrodé, and Universidad de Zaragoza. Centro Politécnico Superior. Servicio de Publicaciones. *El libro del transporte vertical*. Universidad de Zaragoza, 1996.
- [MLS01] Henri Hakonen Marja-Liisa Siikonen, Tuomas Susi. Passenger traffic flow simulation in tall buildings. *Helsinki University of Technology*, 2001.
- [MR88] Abrego E. MacDonald Robert. Coincident call optimization in a elevator dispatching system, 1988.
- [Nak94] Kubo S. Imasaki N. Yoshitsuku T. Kiji J Endo T. Nakai, S. Elevator group control system with fuzzy neural network model. In *The Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 1994.
- [NRJW98] Katia Sycara Nicholas R. Jennings and Michael Wooldridge. A roadmap to cigent research and development. autonomous agents and multi agent systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 1998.
- [OTI99] OTIS. Otis elevatot plan brochure. *Otis Elevator Company*, 1999.
- [PER09] HARRY PERROS. *Computer Simulation Techniques: The definitive introduction*. Computer Science Department, 2009.
- [Pet00] Mehta P. y Haddon J. Peters, R. Lift passenger traffic patterns: applications, current knowledge and measurement. *Elevator World*, 2000.
- [Pow92] B. A. Powell. Important issues in up peak traffic handling. *Elevator Technology*, Proceedings of ELEVCON 92, 1992.
- [R.71] Parker E. R. *ARQUITECTURA DEL ASCENSOR*. 1971.
- [Rao95] Valluru B. Rao. *C++ Neural Networks and Fuzzy Logic*. 1995.
- [Res] Peters Research. Peters research elevate simulator.
- [Sii04a] Marja-Liisa Siikonen. Elevator simulation and control. *KONE Elevators*, 2004.
- [Sii04b] Marja-Liisa Siikonen. Elevator simulation and control. *FORS Seminar*, 2004.
- [SMBB06] Hiroshi Kise Sandor Markon, Hajime Kita and Thomas Bartz-Beielstein. *Control of Traffic Systems in Buildings*. Springer-Verlag London Limited, 2006.
- [Tha89] Kandasamy Thangavelu. Queue based elevator dispatching system using peak period traffic prediction,, 1989.
- [TKK96] Rubiyah Yusof Tan Kok Khiang, Marzuki Khalid. Intelligent elevator control by ordinal structure fuzzy logic algorithm. *ICARCV 97*, 1996.
- [Wei99] Gerhard Weiss. *Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1999.

- [WJ95] M. Wooldridge and N. Jennings. *Intelligent Agents: Theory and Practice*. Knowledge. Engineering Review, 1995.
- [Y] Naitoh Y. A variable ordinal structure model for fuzzy reasoning and its application to decision problem of working order. *International Conference on Control*.
- [Zad73] L. A. Zadeh. Outline of new approach to the analysis complex systems and decision processes. *IEEE Trans.*, 1973.
- [ZJl] ZONG Qun ZHANG Jing-long, TANG Jie2. Energy-saving scheduling strategy for elevator group control system based on ant colony optimization. *IEEE. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences*.

