

# Estado Del Arte Control De Grupo De Ascensores

Andrés Enrique Rosso Mateus

*Universidad Javeriana*

**Resumen**—El uso de las construcciones verticales experimenta un fenómeno de expansión vertiginoso debido al gran precio del terreno y la densidad poblacional de las grandes urbes. El incremento de este tipo de construcciones trae el problema de transportar eficientemente el alto número de personas que estas edificaciones albergan a diario. Los sistemas de control tradicionales 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 [1]. La creciente necesidad hizo que nuevas técnicas más complejas empezaran a ser aplicadas a este problema. El presente artículo hace un recorrido por las técnicas de control modernas usadas para resolver este problema.

**Index Terms**—control robusto, lógica difusa, optimización.

## I. INTRODUCCIÓN

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.

La creciente necesidad hizo que nuevas técnicas más complejas empezaran a ser aplicadas a este problema. Un ejemplo que reta el control de tráfico es el dado por la torre “Burj Khalifa” en Dubai. La cual cuenta con más de 160 pisos y alcanza una altura aproximada de 828mts. El desplazamiento entre los 160 pisos se hace con 58 ascensores cada uno de dos pisos y con capacidad para 14 personas por ascensor.

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.

Se pueden encontrar patentes registradas desde la época de los 80[2], [3]. 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. [4]. Otro ejemplo está en Berlin, el centro académico el Konrad-Zuse-Zentrum für Information

stechnik de Berlin colabora con la multinacional del transporte vertical Schindler [5] o el Systems Analysis Laboratory de la Universidad Tecnológica de Helsinki con KONE Corporation [6].



Figura 1. Burj Khalifa

El presente artículo busca hacer un recorrido por los métodos de control tradicionales y no tradicionales aplicados a este problema. Mientras la sociedad siga creciendo tecnológicamente y demográficamente este tipo de sistemas será de vital importancia, su relevancia es enorme. El avance en esta área ha sido muy grande si se tiene en cuenta que aparece a finales de los años 80, muchas empresas invierten millones de dinero en investigación en esta área.

### I-A. 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. Según los estudios sobre el tema [7], el flujo de pasajeros sigue un proceso de Poisson.

Un ejemplo del tráfico en una edificación real [7], se muestra en la siguiente imagen.

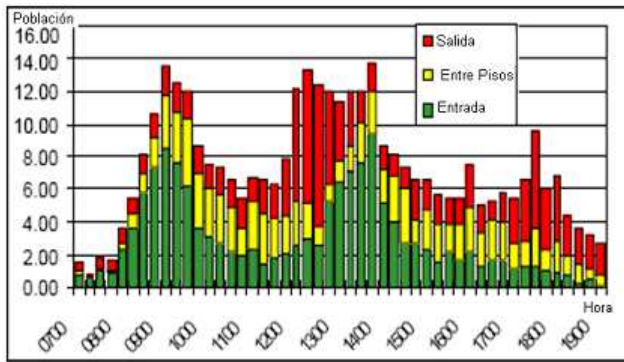


Figura 2. Patrón de tráfico [7]

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 cuatro patrones de tráfico, que ocurren durante el día [8]:

- **Subida -Uppeak-**: se refiere al tramo horario coincidente con el acceso al edificio, y por tanto se producen viajes de subida desde la planta baja.
- **Bajada -Downpeak-**: 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.
- **Almuerzo -Lunchpeak-**: se refiere al tramo horario en el que el edificio se abandona par ir a comer, pero también se accede a él tras venir de comer, dándose una mezcla de los patrones uppeak y downpeak.
- **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).

#### I-B. Determinación Y Predicción Del 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. Otro método es “Estimación del flujo de tráfico completo de Peters” [9], 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 [7], 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 [10]. Este trata de acoplar una red neuronal en el sistema de control de un grupo de ascensores para mejorar la actuación del controlador del grupo. Así, se trata de que la red neuronal proporcione un mecanismo de aprendizaje dinámico del comportamiento del edificio y realice 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.

#### I-C. 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 [11].

Es común que los controladores para grupo de ascensor manejen los mismos criterios de optimización, recopilando todos los criterios vistos se pueden dividir en dos grupos.

##### I-C1. 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.

##### I-C2. Servicio ofrecido al usuario:

1. 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.
2. Tiempo de viaje: Tiempo que el pasajero dura dentro del ascensor hasta que llegue al piso objetivo. El objetivo es minimizar este tiempo.
3. 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 [1].

#### I-D. 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. 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 [12][1]
  - Maniobra Universal Por Pulsadores.
  - Maniobra Duplex.
  - Maniobra Colectiva selectiva en los dos sentidos.
- Técnicas no tradicionales
  - Lógica difusa [13]
  - Optimización robusta [14]
  - Optimización por colonia de hormigas [15]
  - Optimización Híbrida. [16]
  - Aprendizaje reforzado. [17]
  - Algoritmos genéticos.
  - Redes neuronales. [10]
  - Optimización por enjambres. [18]

## II. 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. [12]

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.

### II-A. 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. [1]

### II-B. 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. [1]

### II-C. 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. [1]

## III. MÉTODOS DE CONTROL MODERNOS

### III-A. Controlador Basado En Lógica Difusa

*III-A1. 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, etc. El control difuso puede tratar las imposiciones de los sistemas para dar soluciones en condiciones más reales y menos ideales, la estructura de un controlador difuso por lo general es la siguiente.

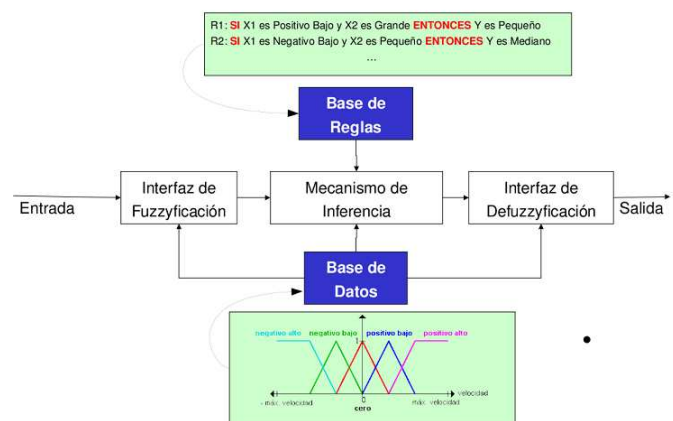


Figura 3. Proceso controlador difuso

*III-A2. Formulación del Problema [13]:* Para el desarrollo del controlador difuso se requiere inicialmente definir los objetivos, las restricciones y el comportamiento del sistema. Esto se hace por medio de los conjuntos de entrada y de salida del sistema, las reglas de inferencia y la ponderación asociada a cada una de estas reglas.

### III-A3. Conjuntos De Entrada:

- Tiempo De Espera (Waiting Time W): Representa el tiempo que un elevador necesita para viajar desde su posición actual hasta el piso en el que se genera la llamada, este tiempo también puede interpretarse como aquel que debe esperar el pasajero para que llegue el ascensor.
- Tiempo de viaje (Riding Time R): Comprende el tiempo que permanece un pasajero dentro del ascensor, hasta ser transportado a su piso destino.
- Carga (Loading L): Entendido como el número de pasajeros que se encuentran dentro del ascensor.
- Distancia de Viaje (Travelling Distance T): Distancia que existe entre la posición actual del elevador y el piso en el que se generó la llamada, está dada en términos de pisos.
- Peso del destino de la llamada (Destination Area Weight D): Se entiende como el peso que le asigna el elevador al piso de destino de la nueva llamada. Teniendo en cuenta que cada ascensor compite por tomar la llamada, el peso de destino de ésta es la importancia que cada ascensor le da al destino de llamada, por ejemplo si un ascensor tenía encolada una llamada a este mismo piso, el peso de esta llamada va a ser alto.

**III-A4. Conjuntos De Salida:** La salida del controlador difuso es la prioridad que cada ascensor tiene sobre una llamada específica, el ascensor que tenga la prioridad mas alta, será el que al final se haga cargo de ésta.

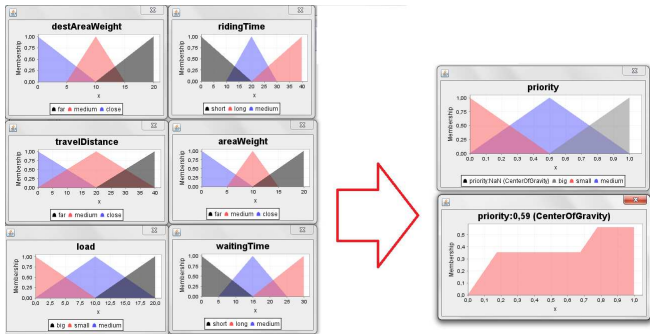


Figura 4. Conjuntos difusos

**III-A5. Reglas De Inferencia:** A continuación se presentan las reglas de inferencia.

REGLAS DE INFERENCIA			PESO
R1	Si el Tiempo de espera es <b>CORTO</b> entonces la prioridad es <b>ALTA</b>		0,7
R2	Si el Tiempo de espera es <b>MEDIO</b> entonces la prioridad es <b>MEDIA</b>		0,7
R3	Si el Tiempo de espera es <b>ALTO</b> entonces la prioridad es <b>BAJA</b>		0,7
R4	Si el Tiempo de viaje es <b>CORTO</b> entonces la prioridad es <b>ALTA</b>		0,4
R5	Si el Tiempo de viaje es <b>MEDIO</b> entonces la prioridad es <b>MEDIA</b>		0,4
R6	Si el Tiempo de viaje es <b>ALTO</b> entonces la prioridad es <b>BAJA</b>		0,4
R7	Si la Carga es <b>LIGERA</b> entonces la prioridad es <b>ALTA</b>		0,5
R8	Si la Carga es <b>MEDIANA</b> entonces la prioridad es <b>MEDIA</b>		0,5
R9	Si la Carga es <b>PESADA</b> entonces la prioridad es <b>BAJA</b>		0,5
R10	Si la Distancia de Viaje es <b>CORTA</b> entonces la prioridad es <b>ALTA</b>		0,5
R11	Si la Distancia de Viaje es <b>MEDIA</b> entonces la prioridad es <b>MEDIA</b>		0,5
R12	Si la Distancia de Viaje es <b>GRANDE</b> entonces la prioridad es <b>BAJA</b>		0,5
R13	Si el Peso del destino de la llamada es <b>CERCA</b> entonces la prioridad <b>ALTA</b>		0,4
R14	Si el Peso del destino de la llamada es <b>MEDIANO</b> entonces la prioridad <b>ALTA</b>		0,4
R15	Si el Peso del destino de la llamada es <b>LEJOS</b> entonces la prioridad <b>BAJA</b>		0,4

Figura 5. Reglas difusas

### III-A6. Parámetros De Controlador Difuso:

- Defuzificación por centro de gravedad:  $\frac{\int x f(x) dx}{\int f(x) dx}$
- Reglas difusas están ponderadas entre 0 y 1.
- Mecanismo de Inferencia (Mandami):  $\min(U_1(x), U_2(x))$

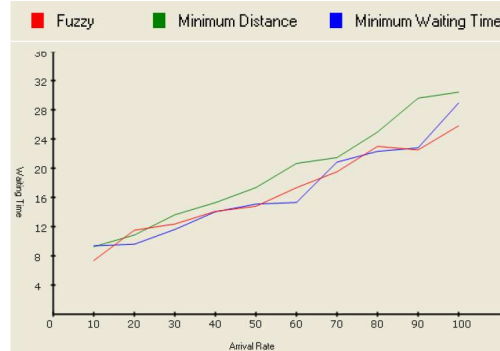


Figura 6. Tiempo de espera

### III-A7. Resultados Tiempo De Espera [19] :



Figura 7. Tiempo de viaje

### III-A8. Resultados Tiempo De Viaje [19] :

### III-A9. Conclusiones:

- La lógica difusa permite representar fácilmente, los objetivos de control.
- Los resultados obtenidos son buenos en cuanto al rendimiento del controlador.
- El controlador es robusto, ya que las variaciones pequeñas del sistema no afectan el resultado.
- Es posible mejorar aún más el rendimiento optimizando los conjuntos difusos y la ponderación de las reglas.
- Es fácil implementar este método de control computacionalmente.
- El controlador propuesto debe ser ajustado a la edificación para obtener resultados óptimos.

### III-B. Controlador Basado En Optimización Robusta

**III-B1. Introducción:** 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 [20].

Los valores de los datos que se usan en el modelo son a veces estimaciones basadas en una predicción de las condiciones futuras. Para no tener que resolver un nuevo problema cada vez que se produce un cambio en los datos o saber hasta que punto es fiable la solución, se han desarrollado entre otras técnicas la optimización robusta. Una integración de la programación por objetivos con una descripción de los datos del problema basados en escenarios posibles. Con esto se generan una serie de soluciones que progresivamente se convierten en menos sensibles a las posibles realizaciones de los diferentes escenarios.

El término robusto se puede emplear en dos acepciones: respecto a la optimalidad y respecto a la factibilidad. Una solución es robusta respecto a la optimalidad si se mantiene “cerrada” en el óptimo, es decir, si varía muy poco la solución óptima, para la realización de cualquier escenario.

- Los métodos de optimización robusta permiten trabajar con cierta incertidumbre en los parámetros.
- A través de la generación de una serie de soluciones, se generan otras menos sensibles a los posibles cambios en los parámetros.
- Se dice que una solución es robusta si es casi óptima en todos los escenarios posibles. [14]

### III-B2. Objetivos [14]:

- Predecir el flujo de tráfico y estimar el error para su corrección.
- Controlar la asignación de ascensor por medio de Optimización Robusta para así manejar la incertidumbre.
- Utilizar sistemas multiagente para reducir la complejidad computacional.

### III-B3. Planteamiento Del Problema [14]: Función Objetivo

$$\min f(x, \xi)$$

$$s.t. g_i(x, \xi) \leq 0, \forall \xi \in U, i = 1, \dots, m$$

$x$  es la variable de diseño

$\xi$  es el conjunto de datos del problema, los cuales son estocásticos.

La solución encontrada debe  $x^*$ , debe satisfacer todas las posibles realizaciones de la función de restricción  $g_i(x, \xi)$ .

### III-B4. Parámetros:

- $P(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$ , probabilidad de arribo.
- $P_i^*$ , predicción de tráfico.
- $P_i = P_i^* + \Delta P_i$ ,  $\Delta P_i \in [-\sigma_i, \sigma_i]$  predicción de tráfico.
- $P_{iu}$ ,  $i = 1, \dots, m$ . Llamadas de subida en el piso  $i$ .
- $P_{id}$ ,  $i = 1, \dots, m$ . Llamadas de bajada en el piso  $i$ .
- $r_{iku}$ ,  $i = 1, \dots, m$ ;  $k = 1, \dots, n$ . Costo del ascensor  $k$  que es despachado para responder la llamada de subida en el piso  $i$ .
- $r_{ikd}$ ,  $i = 1, \dots, m$ ;  $k = 1, \dots, n$ . Costo del ascensor  $k$  que es despachado para responder la llamada de bajada en el piso  $i$ .
- $r_{id}$  y  $r_{iu}$ , vectores costo para las llamadas de subida y de bajada en el piso  $i$ .
- $x_{iu}$ , despacho para la llamada de subida  $i$ .
- $x_{id}$ , despacho para la llamada de bajada  $i$ .

### III-B5. Formulación Robusta EGCS:

- Debe ser computacionalmente tratable del problema

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n p_{iu}(r_{iu})^T x_{iu} - \sum_{i=1}^m p_{id}(r_{id})^T x_{id} \mid x \geq 0 \right\}$$

$$s.t. P_{iu}, P_{id} \in U = \left\{ \sum_{i=1}^m \frac{(P_i - P_i^*)^2}{\sigma_i^2} \leq \theta^2, i = 1, \dots, m \right\}$$

$$\text{en donde, } r_i = \sqrt{\rho_w T_{wi}(p)^2 + \rho_c C_{ip}^2}, \quad \rho_w + \rho_c = 1$$

siendo  $T(p)$  el tiempo de espera,  $C$  el número de paradas necesarias y  $\rho$  son los pesos de cada criterio.

### III-B6. Representación Cuadrática del Problema:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n (p_{iu}^*(r_{iu})^T x_{iu} + p_{id}^*(r_{id})^T x_{id}) - \theta V^{1/2}(x) \right\}$$

$$V(x) = \sum_{i=1}^m ((r_{iu})^T x_{iu})^2 \sigma_{iu}^2 + (r_{id})^T x_{id})^2 \sigma_{id}^2$$

La demostración se encuentra en [21].

**III-B7. Representación Gráfica:** Es quizás más sencillo ver la formulación del problema gráficamente. El radio de estabilidad en determinado punto, es la bola más grande que puede ser formada con centro en el punto  $\tilde{p}$ . En donde todos los puntos interiores satisfacen las condiciones de estabilidad de la solución.

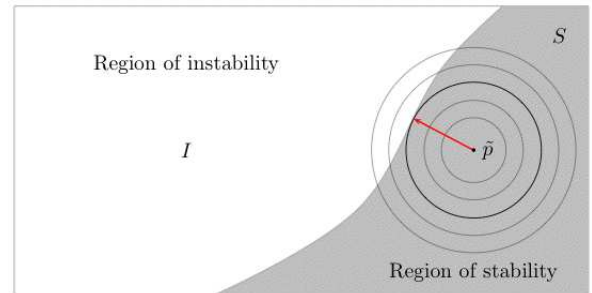


Figura 8. Radio de robustez

**III-B8. Resultados:** El autor del artículo finalmente saca las siguientes conclusiones del trabajo de investigación.

- Las llamadas son asignadas eficientemente.
- Si se cuenta con un gran número de pisos y de ascensores esta solución no es factible ya que implica gran costo computacional.

TABLE I. RESULT OF SIMULATION

Performance:						
Algorithm:		AWT	ATT	RWLT	ACD	NSS
Traffic flow:						
TR1	AL1	29.17	49.28	15.4%	8.97	190
	AL2	22.01	50.51	5%	9.21	176
	AL3	<b>24.29</b>	<b>48.20</b>	<b>8%</b>	<b>9.25</b>	<b>181</b>
TR2	AL1	24.45	27.31	21.3%	3.71	91
	AL2	21.05	30.40	8%	2.65	87
	AL3	<b>18.36</b>	<b>24.10</b>	<b>4%</b>	<b>2.74</b>	<b>82</b>
TR3	AL1	27.65	27.38	12.5%	5.62	188
	AL2	25.33	31.32	7.4%	5.56	189
	AL3	<b>23.36</b>	<b>28.75</b>	<b>6.4%</b>	<b>6.26</b>	<b>176</b>
TR4	AL1	26.61	35.42	16.3%	5.87	431
	AL2	24.14	37.52	7.3%	5.44	418
	AL3	<b>21.96</b>	<b>32.03</b>	<b>6.2%</b>	<b>5.71</b>	<b>407</b>

Figura 9. Resultados comparación

### III-B9. Conclusiones:

- La optimización robusta es una muy buena opción para resolver este problema ya que garantiza convergencia al óptimo.
- La optimización robusta es tolerante a pequeñas variaciones en las condiciones iniciales de optimización.
- La implementación computacional de este algoritmo es muy compleja y el tiempo de ejecución será muy pobre.
- La eficiencia de la solución obtenida con este método es alta, más es costoso su tiempo de ejecución.
- No es necesario conocer las distribuciones de probabilidad de los parámetros del problema.
- La optimización robusta cuenta con rigor matemático, es demostrable la efectividad.

### III-C. Optimización Por Colonia De Hormigas [15]

Los algoritmos de optimización por hormigas son buenos para resolver problemas de optimización combinatoriales. Tienen gran velocidad de convergencia para encontrar la solución óptima.

**III-C1. Modelo Del Problema.:** En el siguiente diagrama se presenta la arquitectura del controlador. El número de hormigas es  $n$ , el número de pisos es  $m$ . Las llamadas de subida, bajada están representadas por  $u$  y  $d$  respectivamente. Una topología válida es aquella que circula por todos los nodos de llamadas a través de las hormigas. Por ejemplo la topología ( $u_1 \rightarrow u_2 \rightarrow dq$ ), significa que un ascensor tomar las llamadas de subida 1 y 2 para después servir la llamada de bajada  $q$ . Cada plan posible conforma el espacio de búsqueda de la solución al problema, el costo del plan se mide en energía consumida. El camino que represente menor costo será el camino más corto y por lo tanto la solución óptima.

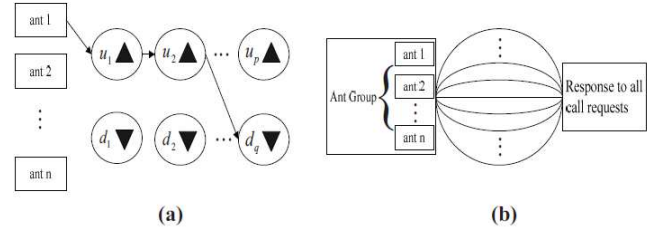


Figura 10. Modelo de control

**III-C2. Restricciones Del Modelo:** El modelo propuesto genera una malla por la cual las hormigas pasaran para encontrar cual es el camino que minimiza el costo, las restricciones que pone el modelo son.

1. Cuando algún plan de elevador atiende todas las llamadas de subida, debe tomar primero la llamada del piso inferior más bajo y seguidamente los más altos.
2. Cuando algún plan de elevador atiende todas las llamadas de bajada, debe tomar primero el pasajero que está en el piso más alto y seguidamente los más bajos.

**III-C3. Modelo De Optimización:** La optimización se realiza por actualizaciones de la feromona y probabilidades de escogencia del elevador.  $\tau_{ij}$  representa la feromona,  $i$  es el índice del elevador y  $j$  es la llamada. Cuando se encuentre una solución factible se debe actualizar la feromona en cada uno de los nodos.

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}^k,$$

$\rho$ , toma un valor entre  $[0,1]$

$\Delta\tau_{ij}^k$ , es el incremento de la feromona sobre el camino  $ij$ .

Se busca de esta manera la solución óptima iterando sobre el grupo de elevadores. La decisión sobre si el ascensor  $i$  atiende la llama está basada en el valor de la feromona, para entenderlo un poco mejor se presenta el siguiente diagrama de flujo.

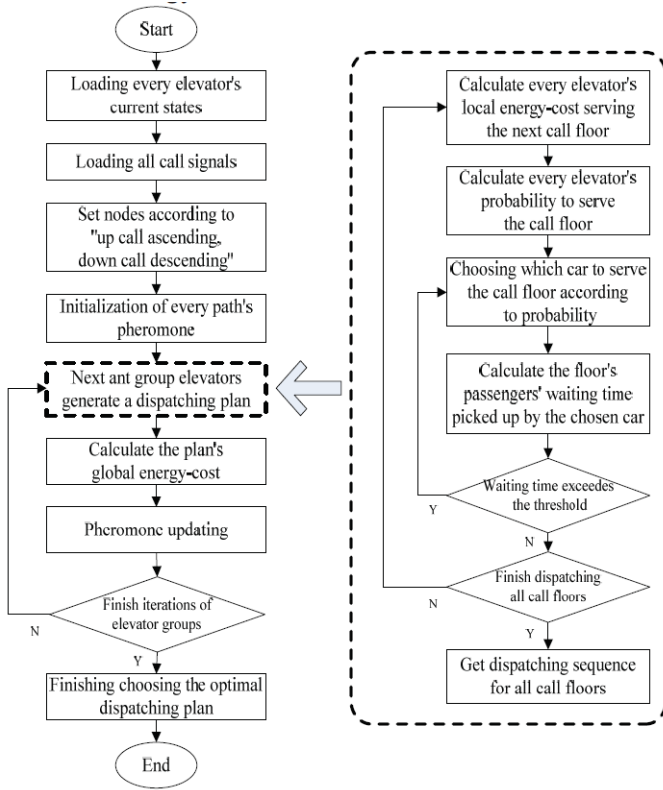


Figura 11. Modelo de control

**III-C4. Simulación:** Se realizaron pruebas para verificar el controlador basado en colonias de hormigas simulando una edificación de 16 pisos y 4 elevadores. Se comparan los resultados frente a otros dos controladores eficientes, Static y Min Waiting Time. Los resultados experimentales se presentan a continuación.

#### RESULTS OF SIMULATION

Traffic Flow	Dispatching Strategy	Average Waiting Time(s)	Energy-cost of EGCS(kJ)
Uppeak	Static	32.50	36380.66
	Min Waiting Time	39.47	38202.14
	Ant Colony	49.80	33314.89
Random Interfloor	Static	63.25	21624.82
	Min Waiting Time	36.29	22135.11
	Ant Colony	37.13	21338.74
Downpeak	Static	42.15	39729.03
	Min Waiting Time	35.55	40526.38
	Ant Colony	32.31	36364.63

Figura 12. Resultados de la simulación

#### III-C5. Conclusiones:

- Se propone 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 convergencia a la solución óptima es lenta, debido a que el espacio de búsqueda es muy grande.
- Al ser tan elevado el tiempo de respuesta del algoritmo es difícil implementarlo en la realidad ya que la respuesta debería ser casi inmediata.
- No se garantiza un óptimo global con este algoritmo.
- Si el espacio de solución del sistema crece mucho, se vuelve intratable el problema.

#### III-D. Controlador Híbrido Para Grupo De Ascensores [16]

**III-D1. Introducción:** 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 este artículo se presenta un método de control híbrido -Red Neuronal y PSO-.

**III-D2. Funciones De Costo:** Los parámetros de optimización están basados en tres criterios: Tiempo de viaje, tiempo de espera, energía consumida. Estas variables se incluyen en la función de costo de esta manera.

$$\mu_i = W_1 T_{AWT(i)} + W_2 T_{RM(i)} + W_3 T_{PC(i)}$$

$$Z = \min(\mu_1 \mu_2 \dots \mu_i)$$

En donde  $i$  es el número de ascensores.

$\mu$  es el criterio de la función de costo de los elevadores.

$T_{RM(i)}$ , es el tiempo de viaje.

$T_{PC(i)}$ , es el promedio del tiempo de espera.

$W_1, W_2, W_3$ , son los pesos de cada factor a optimizar.

#### III-D3. Producción Red Neuronal De Base Radial RBF:

El criterio más importante a minimizar en este caso es el tiempo de espera de los pasajeros. Si el controlador es capaz de conocer el tipo de tráfico presente, podría parquear los ascensores óptimamente para reducir este tiempo. [22]

Esto es lo que el controlador de ascensor debe aprender por medio de la red neuronal de base radial RBF. Las redes neuronales de base radial tienen una topología más compacta y necesitan menos iteraciones para aprender.

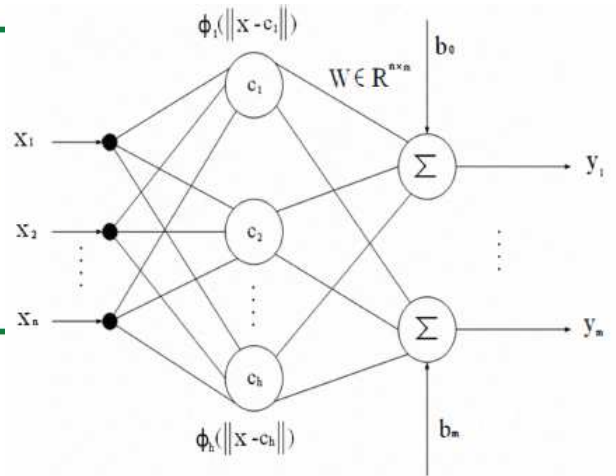


Figura 13. Topología ANN RBF

En donde las entradas están dadas por el vector  $x$ , las función de activación es  $\phi$  y cuenta con tres capas. La salida de la red está dada en la siguiente formula.

$y_k = \sum_{i=1}^h W_i \phi_i \|x - c_i\|$ , La salida indica el tráfico previsto ( $y_1$  indica tráfico de subida,  $y_2$  indica tráfico entre pisos,  $y_3$  indica tráfico de bajada ).

**III-D4. Optimización Por Enjambres:** La optimización por enjambres fue propuesta por Kennedy y Eberhart, esta técnica está inspirada en la inteligencia colectiva de los bancos de peces y aves. Esta poderosa herramienta puede resolver pruebas con discontinuidades, no convexos y multimodales. Cada individuo del enjambre representa una solución del problema en el área factible, los individuos se van moviendo en el espacio de búsqueda y tienen memoria de la mejor posición que han alcanzado.

En este caso particular la optimización por enjambre tiene la función de actualizar los pesos de la red de acuerdo a una función de aptitud 'fitness'. En el siguiente diagrama se observa el algoritmo de control con la optimización por enjambre.

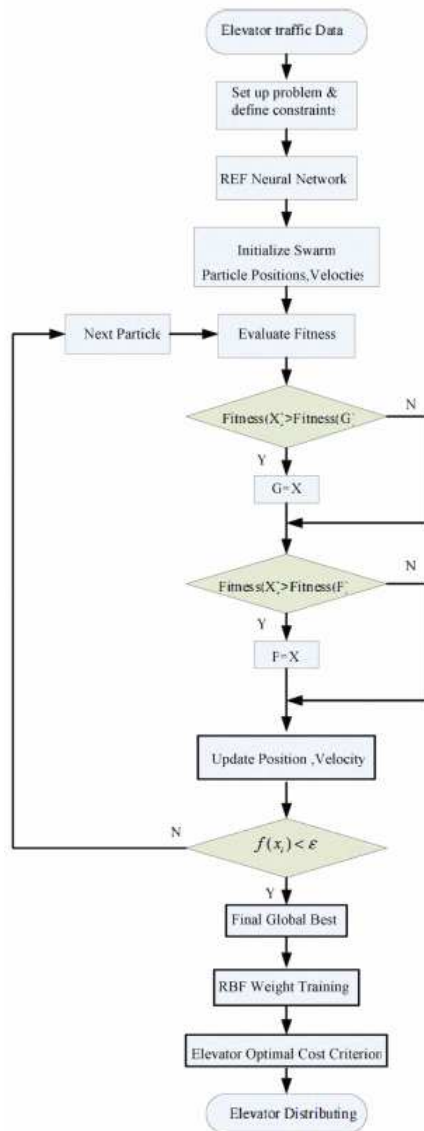


Figura 14. Diagrama de flujo algoritmo RBF+PSO

La técnica de optimización por enjambres hace que la red neuronal converja más rápidamente al óptimo, en el artículo estudiado no se presentan resultados respecto a la verificación del controlador bajo simulación.

#### III-D5. Conclusiones:

- Se propone un mecanismo control híbrido, red neuronal de base radial + optimización por enjambres.
- Se parte del principio que si se conoce el tráfico se pueden parquear los ascensores para que queden más cerca a los pisos en donde hay más usuarios.
- La solución propuesta es buena ya que al tener los usuarios cerca los ascensores el tiempo de espera se reduce.
- Al tener solo un objetivo de control “tiempo de espera”, se está perdiendo la oportunidad de hacer una asignación de llamadas más inteligente.
- 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.
- En una edificación real se pueden presentar mezcla de patrones, para lo cual la red podría no estar entrenada correctamente.

#### III-E. Control Mediante Aprendizaje Reforzado [17]

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.

En el campo de los controladores para grupo de ascensores se usa para recompensar a todo el sistema si la llamada fue atendida correctamente por alguno de sus miembros. Si no fue bien atendida se envía una señal de retroalimentación a cada uno de los nodos que participó en esta decisión. El objetivo del aprendizaje es maximizar los incentivos y está descrita por la siguiente formula.

$R_t = \sum_{i=0}^{\infty} \gamma_i r_{t+i+1}$ , en donde  $\gamma_i \in [0, 1)$  es la tasa de descuento-.

#### III-F. Otros Métodos De Control

Debido a la gran cantidad de métodos de control usados para tratar problemas de optimización, no es posible listar todos. Se presentan a continuación aquellos métodos que al criterio del autor son más innovadores.

- Timed Petri Net Based Approach for Elevator Group Controls. [23]
- A New Hybrid Elevator Group Control System Scheduling Strategy Based on Particle Swarm Simulated Annealing Optimization Algorithm. [24]
- Hybrid Destination Registration Elevator Group Control System with Artificial Immune Optimization Algorithm.[25]
- Multi-Car Elevator System using Genetic Network Programming for High-rise Building. [26]



- Genetic Algorithm For Controllers In Elevator Groups: Analysis And Simulation During Lunchpeak Traffic. [27]
- Real-Time Combinatorial Optimization for Elevator Group Dispatching. [28]

#### IV. SIMULADOR

##### IV-A. Introducción

El proceso de simulación puede ser definido como la imitación de la operación en un proceso real o un sistema sobre el tiempo. [29]

El proceso de simulación comprende tres elementos fundamentales: Sistema real, Modelo, Ordenador. Estos elementos están conectados como se aprecia en la ilustración 10. [29]

El 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.

El comportamiento del sistema debe ser igual al del sistema real para así poder experimentar bajo un ambiente simulado, si el sistema modelado no representa al sistema real de acuerdo a las características que se consideraron relevantes tendrá lugar otra iteración en la cual un nuevo modelo será desarrollado y pasará nuevamente por las etapas de verificación y validación.

El primer simulador de tráfico fue desarrollado para verificar el tráfico en edificaciones altas, tal como el WORLD TRADE CENTER. En este entonces los controladores para grupos de ascensores eran evaluados con simuladores híbridos, los cuales consisten en modelos análogos y digitales. En estos simuladores las tarjetas de control de los elevadores debían ser conectadas con el simulador. Más adelante estos vendrían dentro de minicomputadores en donde varios fenómenos de tráfico eran estudiados. Recientemente estos simuladores pueden ser ejecutados en computadores personales.

##### IV-B. Tipos De Simulación

*IV-B1. 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. [29]

*IV-B2. Simulación de eventos continuos:* Se llama simulación continua a las representaciones numéricas de realidades cambiantes en el tiempo en base a procesos sincronizados; es decir que el tiempo es una única variable global que sirve de referencia para todas las otras variables. [29]

*IV-B3. Simulación Estocástica:* El sistema tiene un comportamiento estocástico debido a que existen componentes aleatorios dentro del sistema. Una de las variables aleatorias que podemos encontrar es la tasa de arribo a determinado piso, ya que nos interesa reproducir el tráfico que posiblemente tendrá un edificio es necesario simular el sistema estocásticamente usando distribuciones de probabilidades que el usuario podrá variar para representar en términos de probabilidad una edificación específica. [29]

##### IV-C. Justificación

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. Por esta razón es necesario desarrollar un simulador de edificios desde el cual se puedan cambiar las condiciones del sistema y medir con exactitud los tiempos registrados por los usuarios.

Para evitar la construcción del simulador se buscó en la comunidad académica opciones libre, pero no se encontró ningún ambiente de simulación. 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.

Actualmente no existen simuladores de código libre para poder verificar los algoritmos de control. Sería importante construir un simulador para uso de la comunidad científica y que a través de este problema se estudien las técnicas de control inteligentes.

Las grandes compañías cuentan con simuladores propios y por obvios motivos no son prestados para fines académicos, ejemplo de estos simuladores son el Building Traffic Simulator, de la empresa finlandesa KONE [8]. Otros más lo tienen OTIS, SCHINDLER, MITSUBISHI.

#### V. CONCLUSIONES

- La investigación en algoritmos de control para grupos de elevadores es un área vigente.
- Aunque existen varios métodos de control, la mayoría de estos tienen una arquitectura centralizada.
- Formular este problema desde la perspectiva de control óptimo resulta difícil por los requerimientos de tiempo de respuesta del sistema ( $< 500$  milisegundos).
- Los métodos híbridos ayudan a mejorar el rendimiento del sistema, pero aumentan la carga computacional.
- La investigación sobre esta área se realiza principalmente en empresas extranjeras, el apoyo financiero que tienen es muy grande.
- Todos los métodos de control tienden al óptimo pero no es fácil comparar el desempeño entre ellos.
- No existe software de simulación de edificios de código abierto, si se quiere investigar sobre este tema es necesario construir un simulador propio.

#### REFERENCIAS

- [1] L. E. Miravete Antonio, *El Libro Del Transporte Vertical*. Centro Politécnico Superior Universidad de Zaragoza, 1996.
- [2] A. E. MacDonald Robert, "Coincident call optimization in a elevator dispatching system," U.S. Patent 4 782 921, 1988.
- [3] K. Thangavelu, "Queue based elevator dispatching system using peak period traffic prediction," U.S. Patent 4 838 384, 1989.
- [4] C. P. Larrañeta J., "Optimización dinámica en sistemas de tráfico vertical," *AICIA Technical Report*, 2001.
- [5] R. J. Hauptmeier D., Krumke, "The online dial-a-ride problem under reasonable load," *Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin*, 1999.
- [6] S. M. L., "Planning and control models for elevators in high-rise buildings," *Doctoral thesis, Helsinki University of Technology*, 1998.

- [7] —, “Elevator group control with artificial intelligence,” *Helsinki University of Technology, Systems Analysis Laboratory, Research Reports*, 1997.
- [8] H. H. Marja-Liisa Siikonen, Tuomas Susi, “Passenger traffic flow simulation in tall buildings,” *Helsinki University of Technology*, 2001.
- [9] M. P. y. H. J. Peters, R., “Lift passenger traffic patterns: applications, current knowledge and measurement,” *Elevator World*, 2000.
- [10] G. Imrak, E. y Barney, “Application of neural networks on traffic control,” *Lift Report*, 2000.
- [11] A. R. Henri M. Hakonen and R. Lahdelma, “Multiobjective optimization in elevator group control,” *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, 2004.
- [12] P. E. R., *ARQUITECTURA DEL ASCENSOR*, IRIS, Ed., 1971.
- [13] R. Y. Tan Kok Khiang, Marzuki Khalid, “Intelligent elevator control by ordinal structure fuzzy logic algorithm,” *ICARCV 97*, 1996.
- [14] Y. J. Liqian Dou, Qun Zong, “A mixed robust optimization and multi-agent coordination method for elevator group control scheduling,” *Tianjin University*.
- [15] Z. Q. 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*.
- [16] X. W. W. Jian Liu, Chengdong WU and T. Zhang, “A hybrid control for elevator group system,” *Third International Workshop on Advanced Computational Intelligence*, 2010.
- [17] A. Crites, R.H. y Barto, “Improving elevator performance using reinforcement learning,” *Advances in Neural Information Processing Systems*, 1998.
- [18] B. B. Brandstatter, “Particle swarm optimization mass-spring system analogon,” *IEEE Transaction*, vol. 38, pp. 997–1000, 2000.
- [19] H. E. Senevirathna, “Intelligent elevator group control system,” 2007.
- [20] N. S. S. Canos, Mocholí, “Aplicaciones económicas de la optimización robusta,” *JORNADAS ASEPUMA*.
- [21] A. Ben-Tal and a. Nemirovski, “Robust convex optimization,” 1991.
- [22] M. Brand and D. Nikovski, “Optimal parking of elevator cars in supervisory group control,” *IEEE Transacions*, 2003.
- [23] W. H. K. Young Cheol Cho, Zavarin Gagov, “Timed petri net based approach for elevator group controls,” *Transaction on Control, Automation, and Systems Engineering*, 2000.
- [24] X. Y. Luo Fei, Zhao Xiaocui, “A new hybrid elevator group control system scheduling strategy based on particle swarm simulated annealing optimization algorithm,” *World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2010.
- [25] —, “A new hybrid elevator group control system scheduling strategy based on particle swarm simulated annealing optimization algorithm,” *World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2010.
- [26] K. H. Lu Yu, Shingo Mabu, “Multi-car elevator system using genetic network programming for high-rise building,” *Graduate School of Information, Production and Systems, Waseda University*.
- [27] L. P. Cortés, J. Larrañeta, “Genetic algorithm for controllers in elevator groups: Analysis and simulation during lunchpeak traffic,” *Escuela Superior Ingenieros, Camino de los Descubrimientos*.
- [28] P. E. Utgoff, “Real-time combinatorial optimization for elevator group dispatching,” *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETIC*, 2010.
- [29] B. J, *Discrete-Event System Simulation*. Prentice Hall, 2000.