

# EL761/CI63F

## Control Inteligente para Problemas Dinámicos de Transporte

**Dra. Doris Sáez**, Alfredo Núñez,  
Diego Muñoz, Freddy Milla, Francisco  
Valencia, Marcela Riquelme,  
Gabriel Moreno

Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Universidad de Chile

**Dr. Cristián Cortés**, Alejandro Tirachini,  
Gustavo Otárola, Alejandra Pillajo  
Departamento de Ingeniería Civil – Transporte  
Universidad de Chile



Foto curso II-2007

# Contenidos

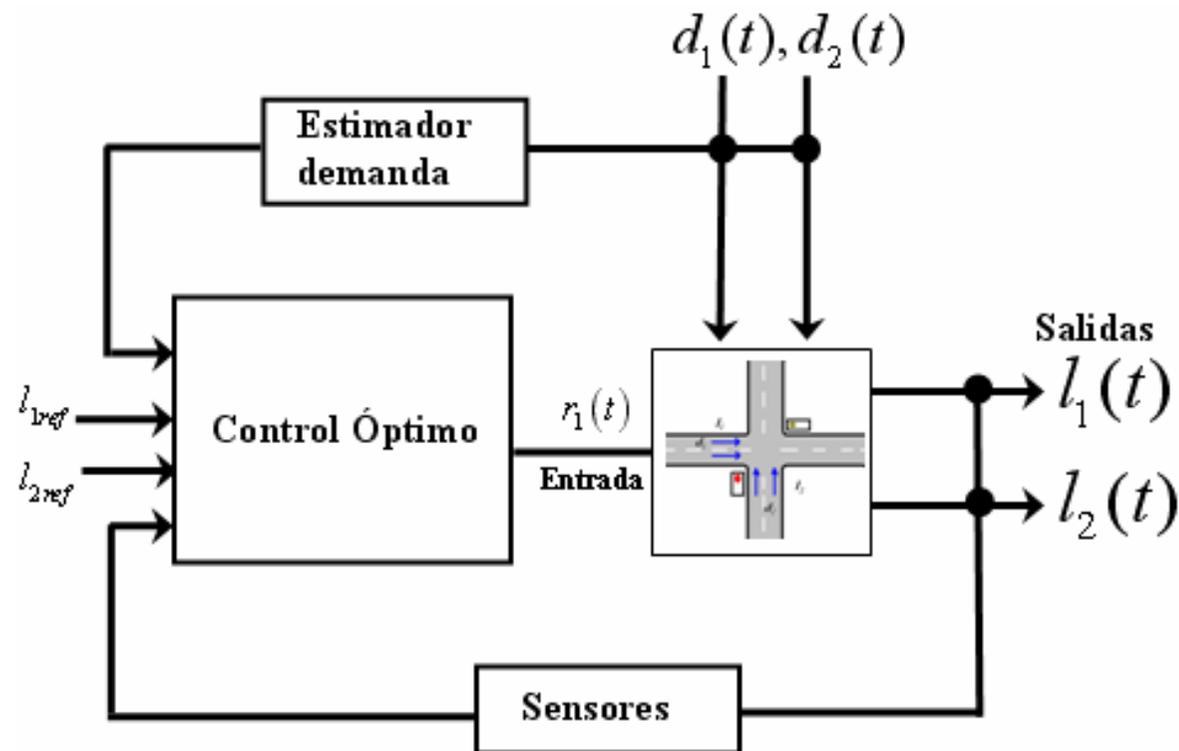
- ◆ Motivación
- ◆ Fundamentos de Control Inteligente
  - Clustering Difuso
  - Control Predictivo
  - Algoritmos Genéticos
- ◆ Aplicación a problemas dinámicos de transporte
  - Sistema de Transporte Público
- ◆ Conclusiones

# Motivación



# Motivación

## Problema Semáforos

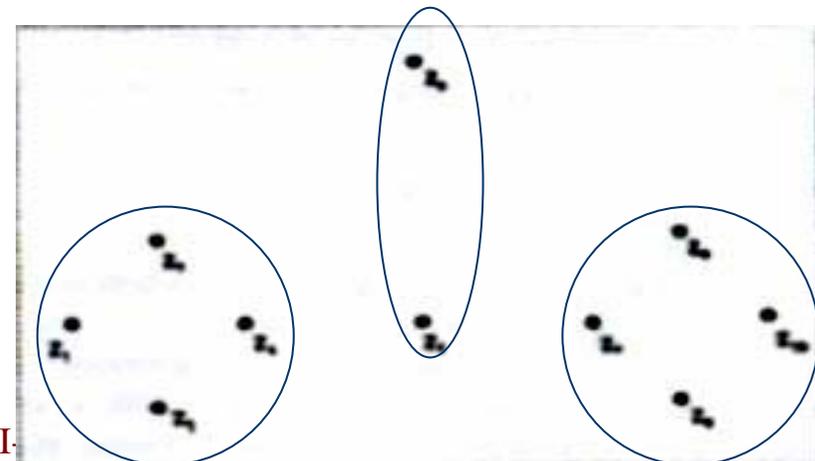


# Control Difuso

- ◆ La lógica difusa asocia incertidumbre a la estructura de un conjunto de datos (Zadeh, 1965). Los elementos de un conjunto difuso son pares ordenados que indican el valor del elemento y su grado de pertenencia.

# Clustering Difuso

- ◆ El clustering difuso corresponde a una generalización natural del Hard clustering, en donde se permite que los grados de pertenencia tomen valores continuos entre 0 y 1 para los distintos elementos que componen los clusters.



# Clustering Difuso

## Fuzzy C-Means Clustering

- ◆ Este es el algoritmo más utilizado para realizar las particiones difusas y se basa en la optimización de un funcional que representa matemáticamente la existencia de similitud entre los datos.

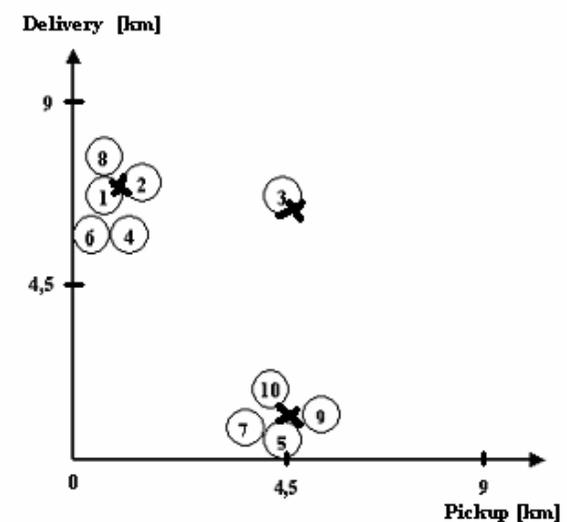
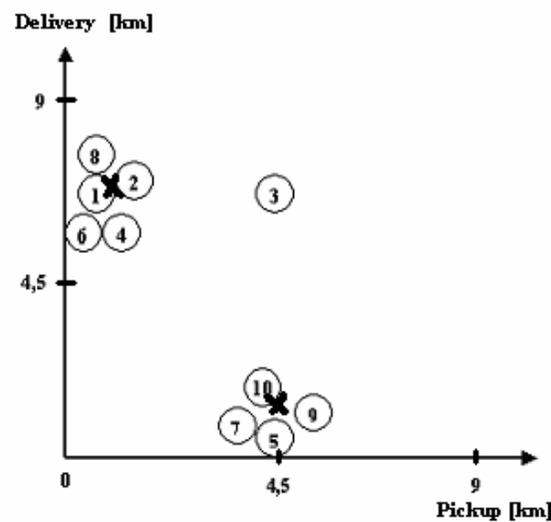
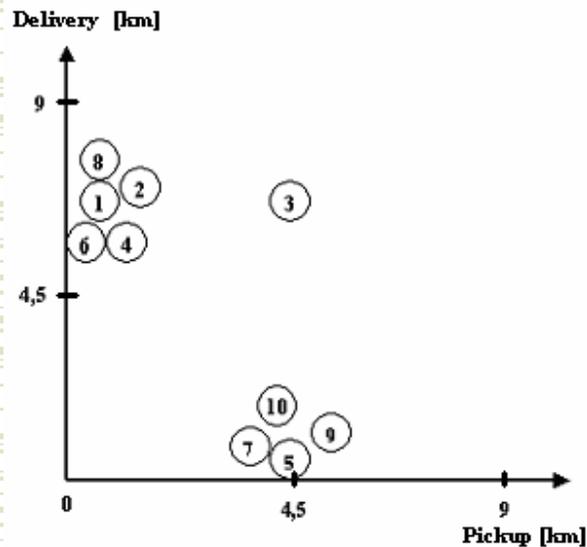
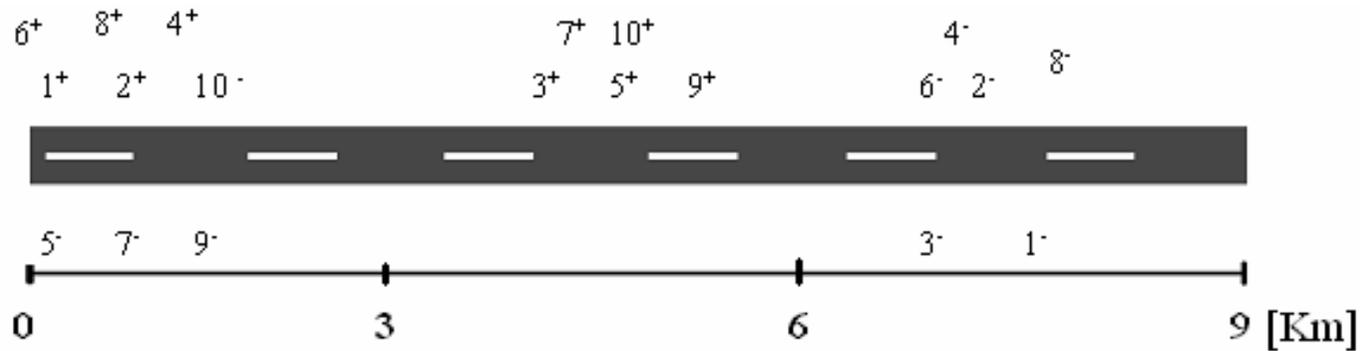
# Clustering Difuso

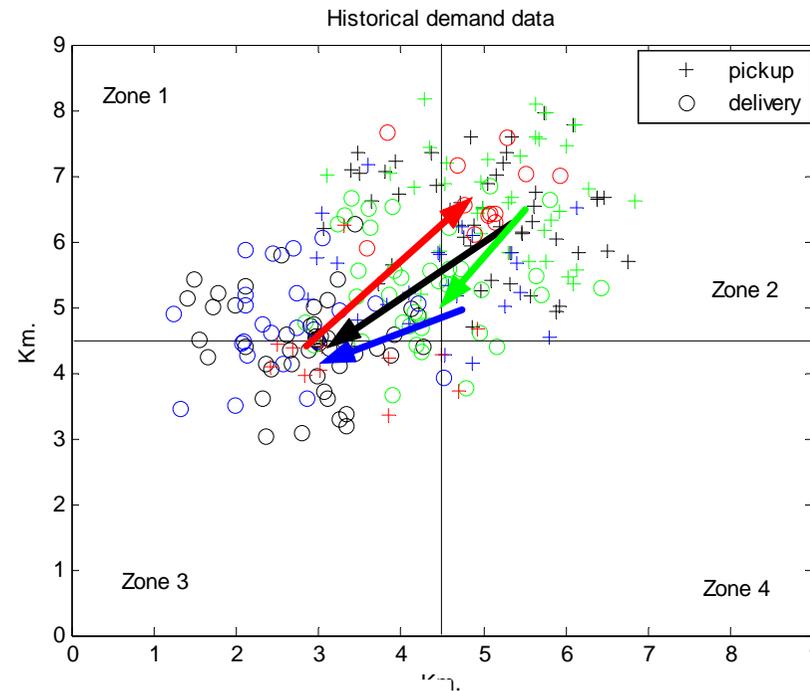
## Fuzzy clustering: Predicción de demanda

- ◆ Metodología de zonificación sistemática
- ◆ División del espacio en regiones para una mejor representación de los patrones históricos de demanda, basándose en clustering difuso
- ◆ Permite clasificar las llamadas origen-destino en clusters flexibles y representativos.

# Clustering Difuso

## Fuzzy clustering: Predicción de demanda





X pickup	Y pickup	X delivery	Y delivery
4.5540	5.7155	2.9218	4.7514
3.7514	4.4812	5.2293	6.2232
4.7989	6.6121	3.0751	4.4972
5.2595	6.5057	4.3494	5.5161

Pickup and delivery coordinates Fuzzy zoning

X pickup	Y pickup	X delivery	Y delivery
6.75	6.75	6.75	6.75
2.25	6.75	2.25	6.75
6.75	6.75	2.25	2.25
6.75	6.75	2.25	6.75

Pickup and delivery coordinates: Classic zoning

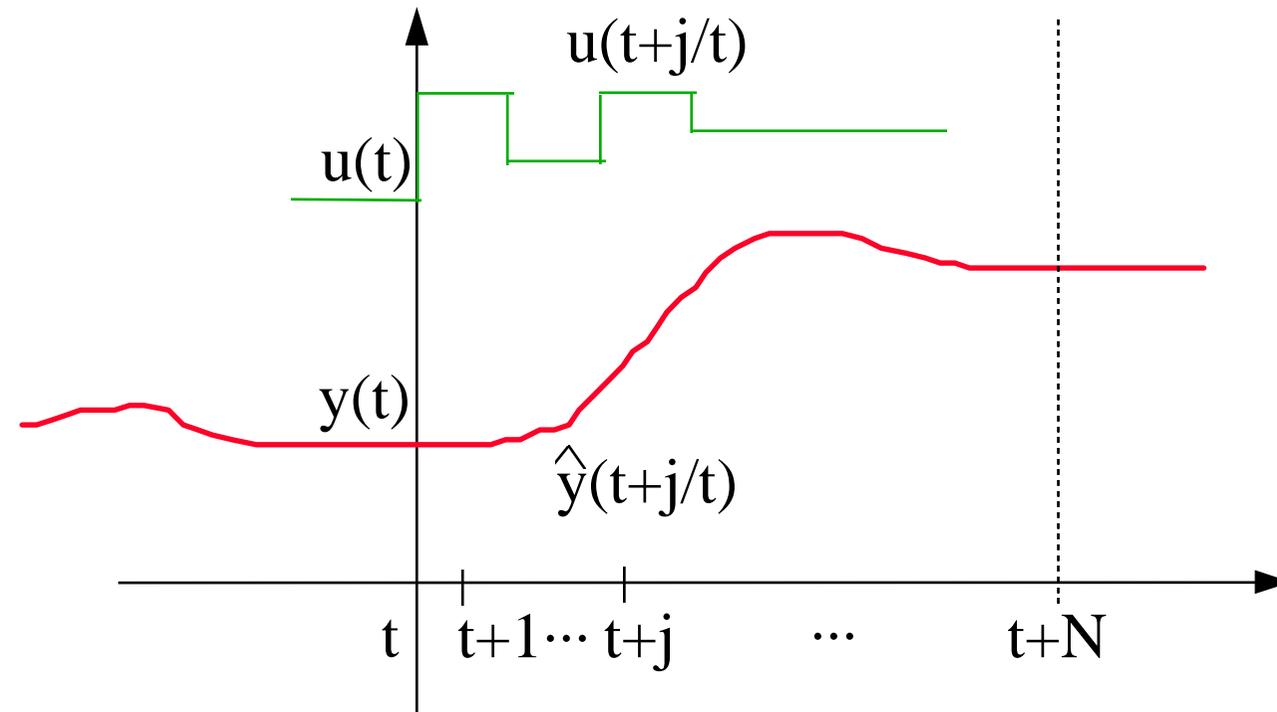
# Control Predictivo

- ◆ El control predictivo se presenta como una atractiva herramienta de control que permite incorporar criterios operacionales a través de la utilización de una función objetivo y restricciones para el cálculo de las acciones de control.
- ◆ Estas estrategias de control han alcanzado un nivel muy significativo de aceptabilidad industrial en aplicaciones prácticas de control de procesos.

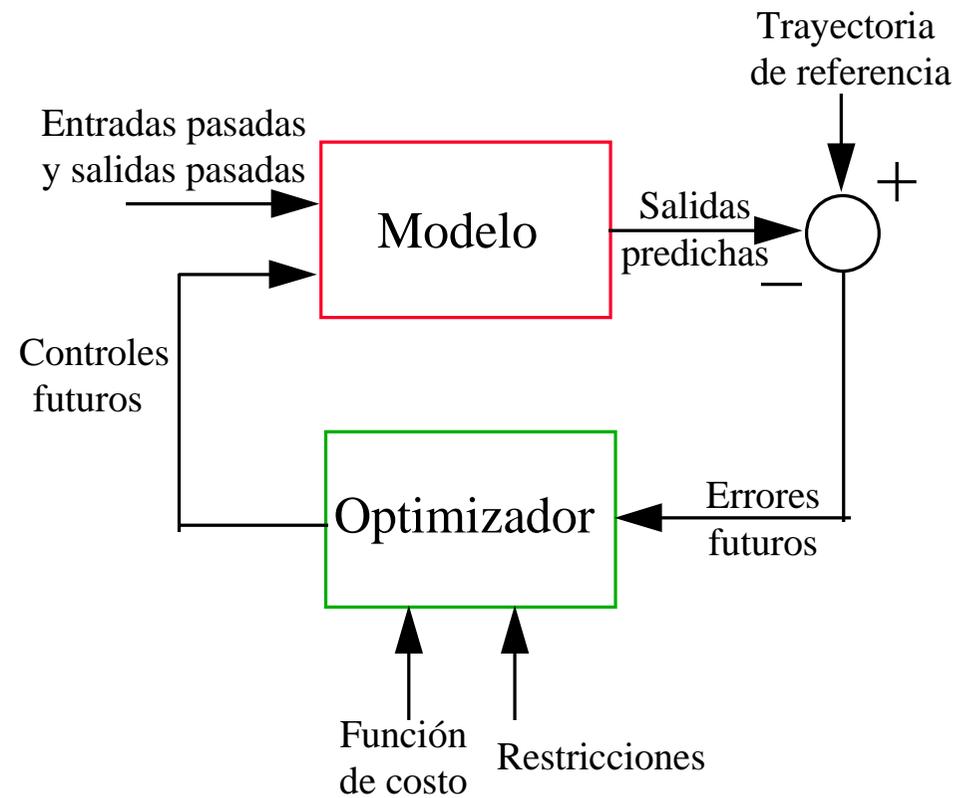
# Control Predictivo

- ◆ El uso de un modelo del proceso que se utiliza para predecir la evolución futura de las variables controladas sobre un horizonte de predicción.
- ◆ El establecimiento de una trayectoria deseada futura, o referencia, para las variables controladas.
- ◆ El cálculo de las variables manipuladas optimizando una cierta función objetivo o función de costos.
- ◆ La aplicación del control siguiendo una política de horizonte móvil.

# Control Predictivo

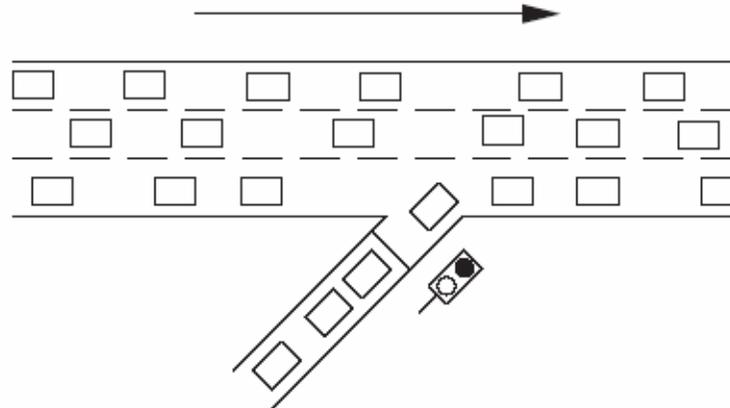


# Control Predictivo



# Control Predictivo

- ◆ Control Predictivo para acceso de pistas (Ramp Metering)



# Controlador PID

$$r(k) = r(k - 1) + K_R(\hat{\rho} - \rho(k)),$$

$r(k)$  es la tasa de metering

$\rho(k)$  es la densidad

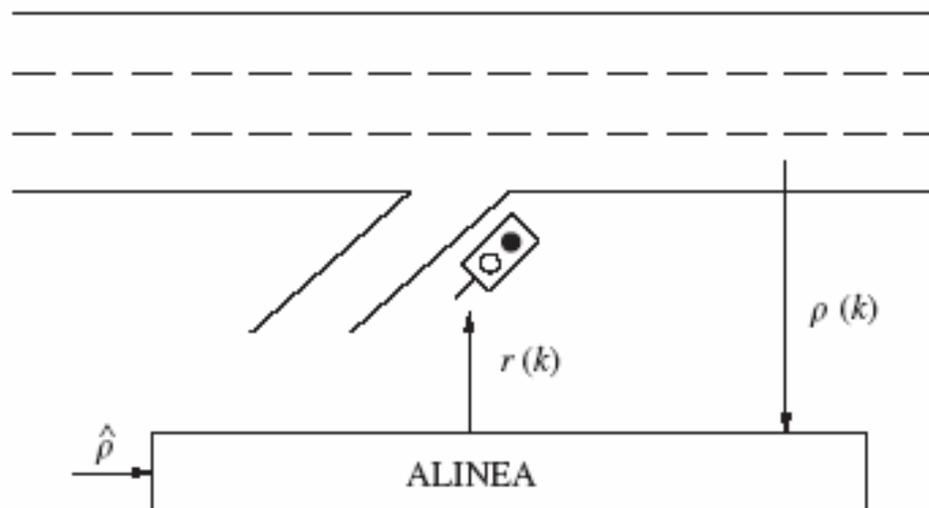


Fig. 3. Control scheme for ALINEA.

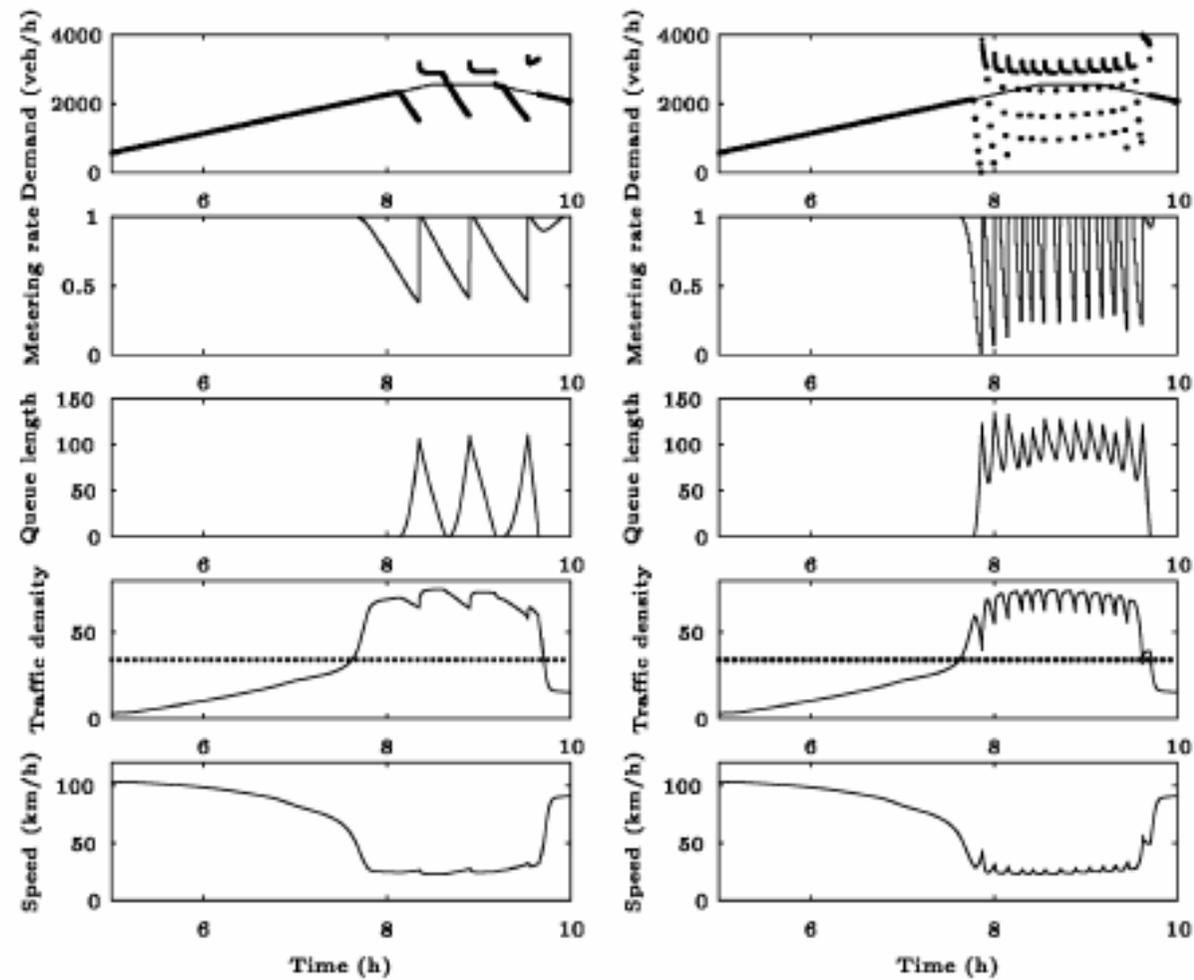
# Control Predictivo

Función objetivo dada por el tiempo total gastado por los vehículos en el área estudiada

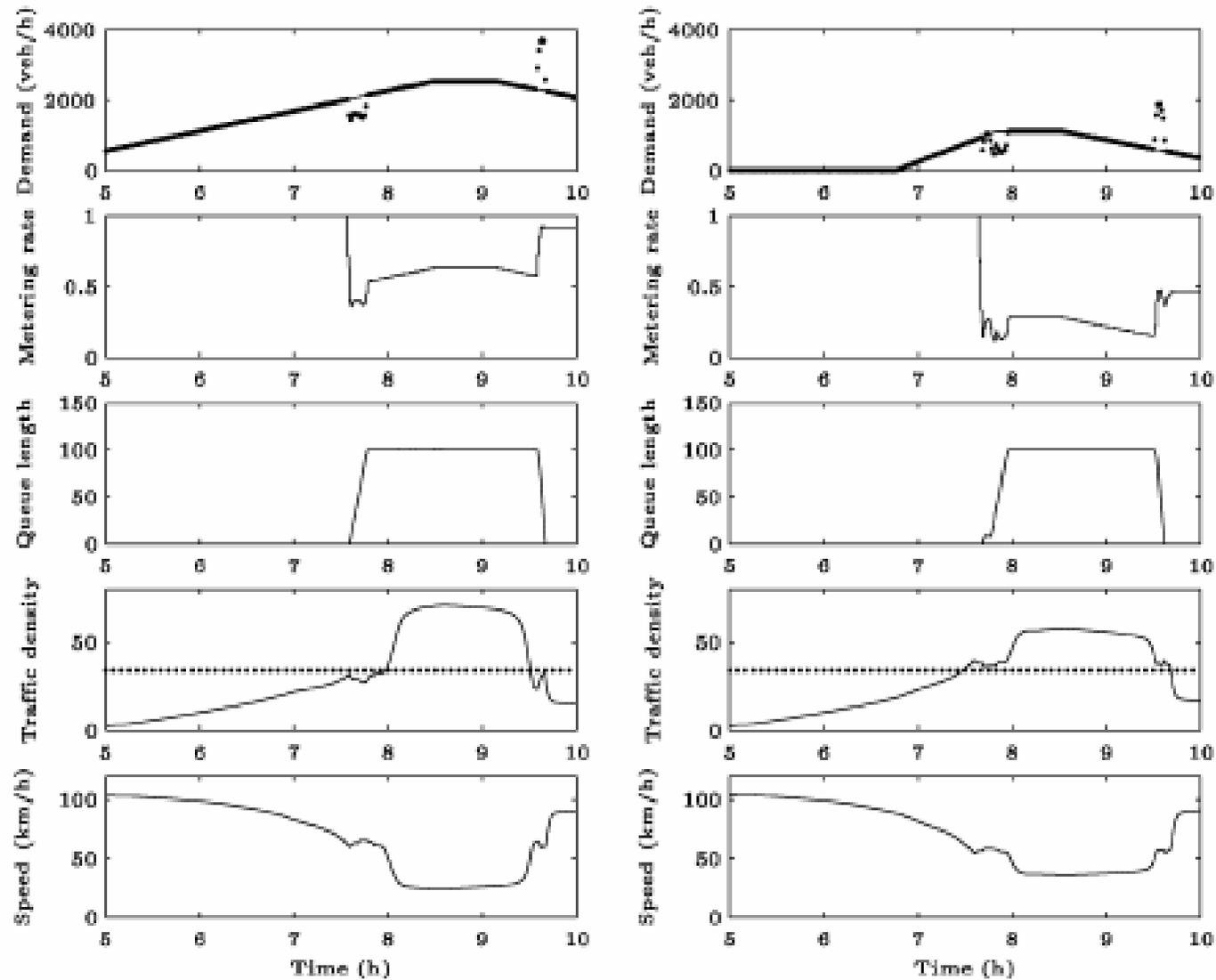
$$J(k_0) = \sum_{k=k_0}^{k_0+N_p-1} \left[ \sum_{j \in \mathcal{J}_s} \rho_j(k) l_j n_j + \alpha \sum_{m \in \mathcal{J}_s} w_m(k) + \alpha_{\text{ramp}} (r(k) - r(k-1))^2 \right] \Delta T_{\text{ctrl}},$$

$w_m(k)$  largo de cola  
 $l_j$  largo de la sección  
 $n_j$  número de carriles

# Controlador PID



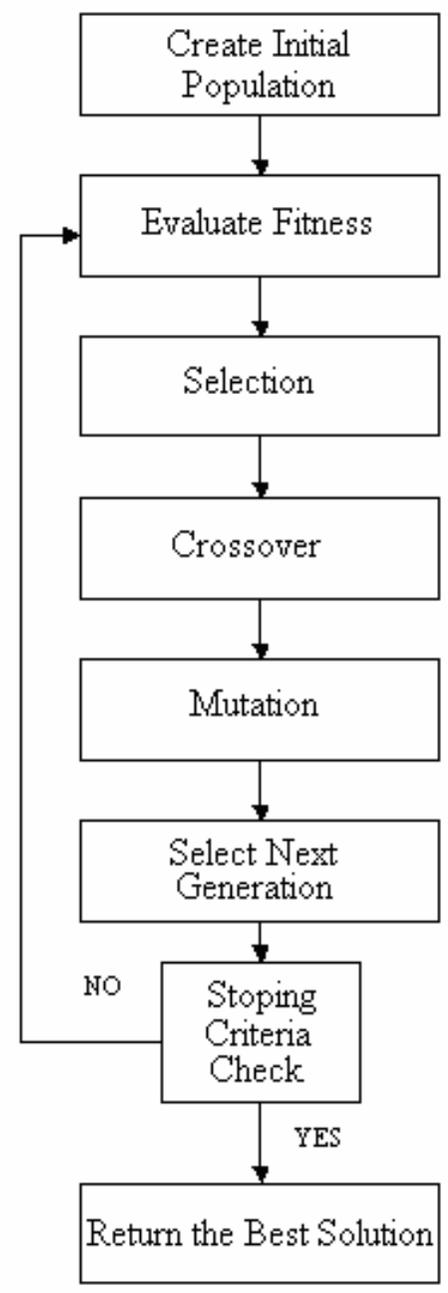
# Control Predictivo



# Algoritmos Genéticos

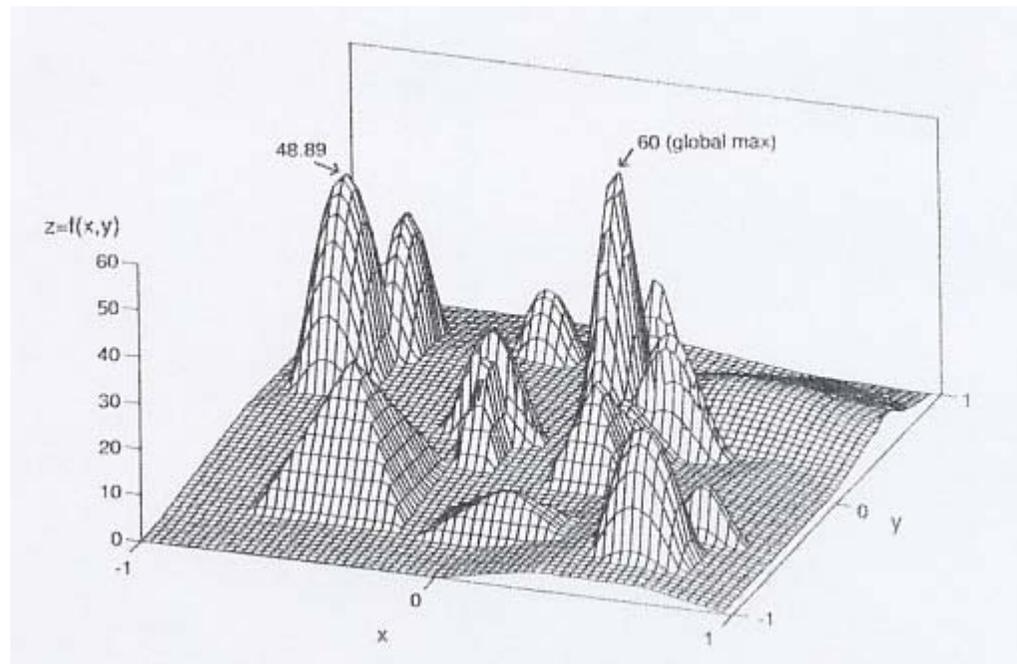
## Algoritmos Evolutivos para resolver la optimización no lineal asociada a Control Predictivo

- ◆ Algoritmos Genéticos (GA). Inspirados en el mecanismo selección natural donde los individuos más fuertes son probablemente los ganadores en un ambiente competitivo.



# Algoritmos Genéticos

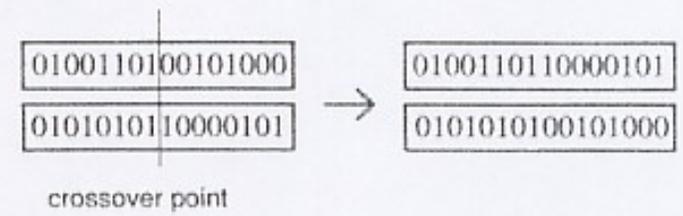
- ◆ Ejemplo  $\text{Max}[z = f(x, y)] \quad x, y \in [-1, 1]$



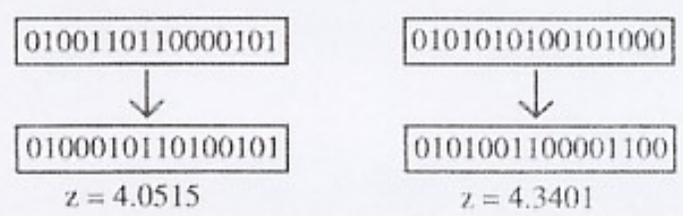
STEP 1: Parent Selection

First Population	x	y	Objective Value z
0100110100101000	-0.0740	-0.6233	5.4297
0101010110000101	-0.1995	0.9541	0.6696
0000010100110110	-0.9529	-0.7175	0.2562
1000101011001011	0.9070	0.1065	4.7937

STEP 2: CROSSOVER



STEP 3: MUTATION



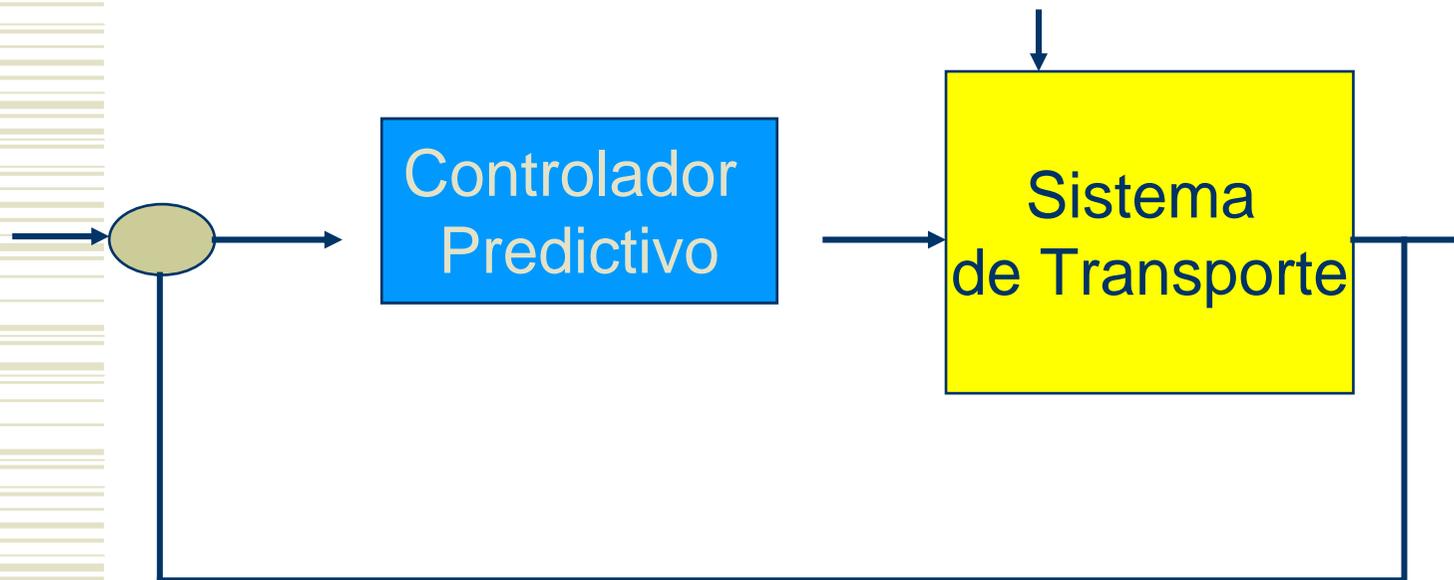
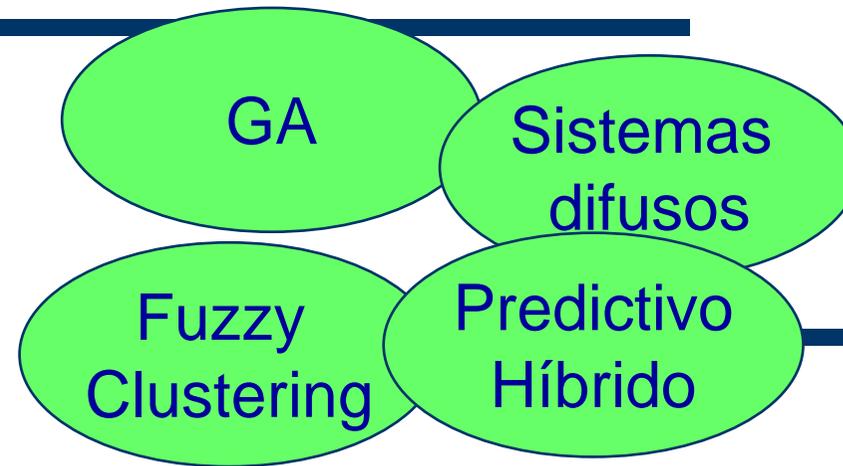
STEP 4: Reinsertion

First Population	x	y	Objective Value $z = f(x,y)$
0100110100101000	-0.0740	-0.6233	5.4297
0100010110010101	-0.0504	0.5539	4.0515
0101001100001100	-0.2309	-0.9372	4.3401
1000101011001011	0.9070	0.1065	4.7937

Fig. 1.14. Generation to generation

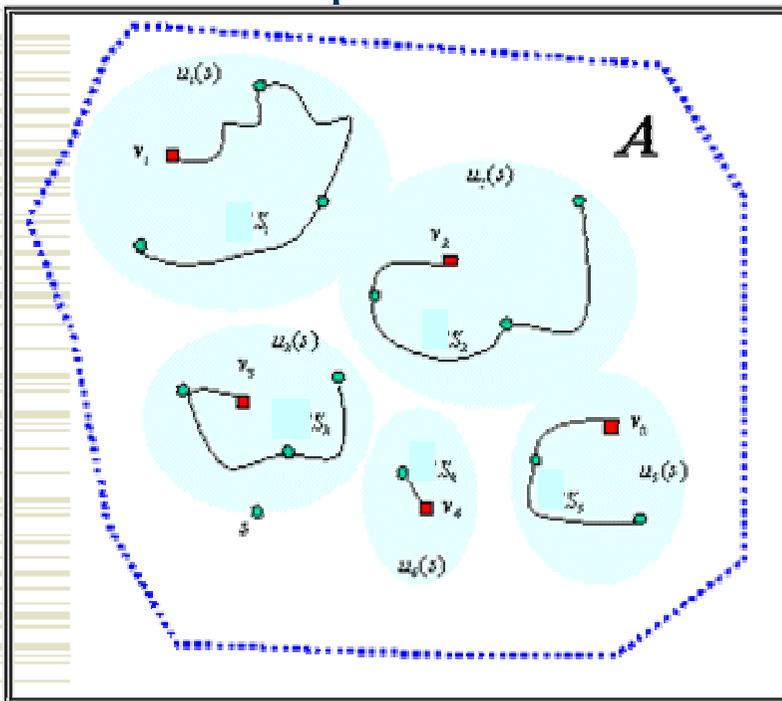
# Contenidos

- ◆ Motivación✓
- ◆ Fundamentos de Control Inteligente
  - Control Difuso y Clustering Difuso✓
  - Control Predictivo✓
  - Algoritmos Genéticos✓
- ◆ Aplicación a Problemas Dinámicos de Transporte
  - Sistema de Transporte Público
- ◆ Conclusiones

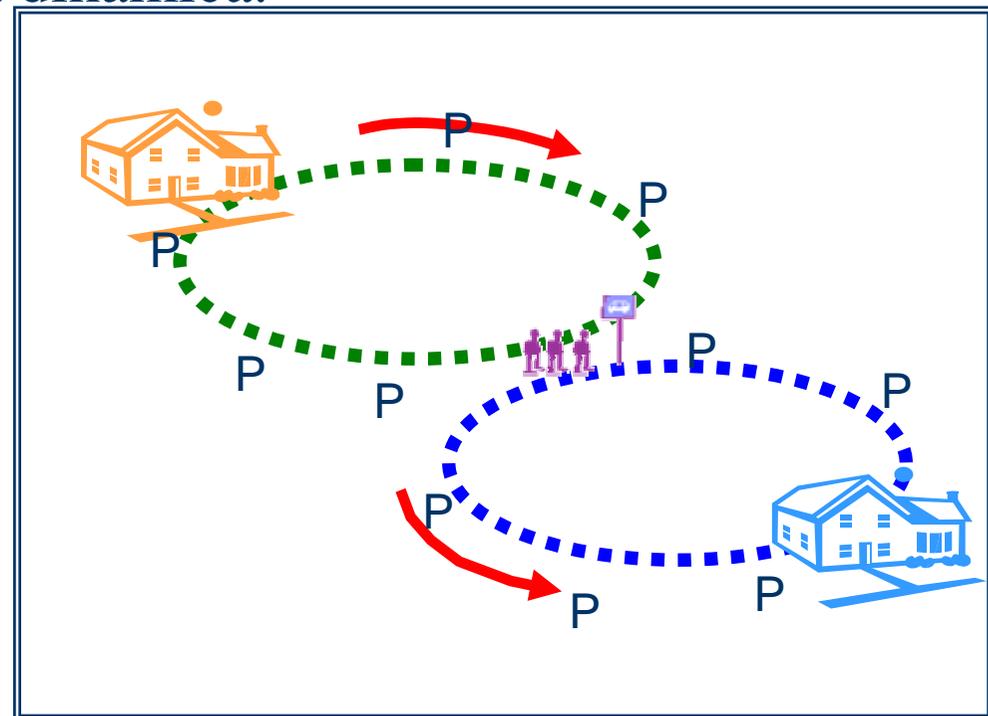


# Problemas Dinámicos de Transporte

- ◆ Optimización y modelación de sistemas públicos de transporte con demanda dinámica.



Dial-a-ride



Public transport

# Problemas Dinámicos de Transporte

- ◆ Demanda dinámica: se genera en **tiempo real**
- ◆ Optimización de recursos (pasajeros y operador) considerando información histórica de demanda y velocidad (modelo predictivo) o bien información online
- ◆ Enfoque de Control Predictivo Adaptivo Híbrido para modelar sistemas: modelo en tiempo discreto
- ◆ Paso variable ( $k$ ) y depende del tiempo entre eventos relevantes

# Sistema de Transporte Público

- ◆ **Tiempos de Espera:** Son directamente proporcionales a la magnitud de los intervalos entre los buses del mismo recorrido.
- ◆ **Tiempos de Viaje:** Se ven afectados por tanto por las perturbaciones del sistema como las acciones que sobre éste se pueden tomar.
- ◆ **Objetivo:** Desarrollo de estrategias de Control Predictivo Híbrido para regulación de intervalos entre buses de cada recorrido

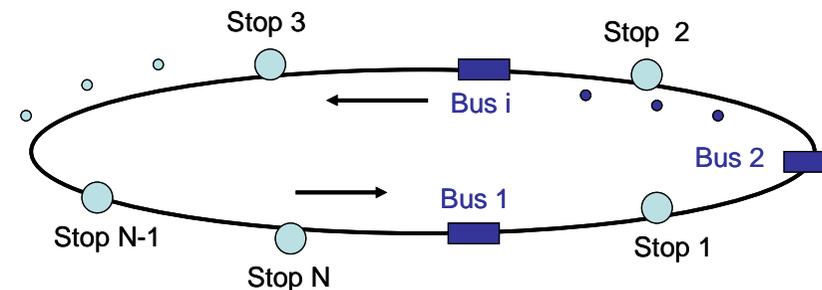
# Sistema de Transporte Público

- ◆ El modelo consiste en:

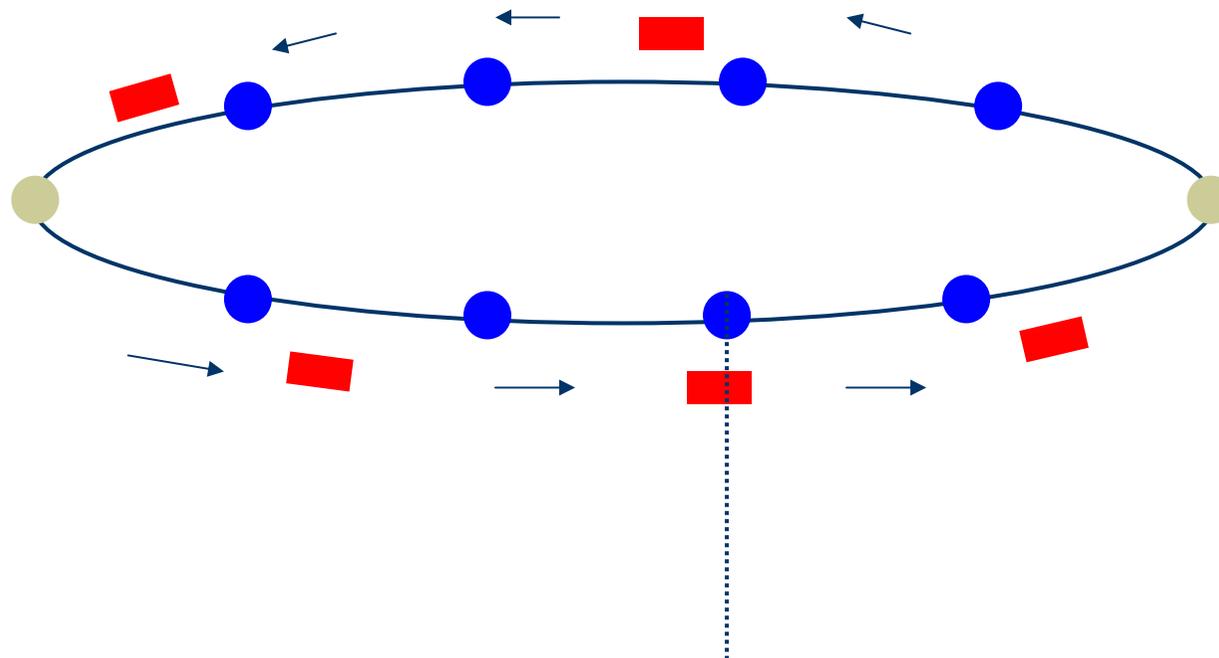
- m buses
- t semáforos
- n paraderos
- Perturbaciones

- Acciones de control

- ✓ Holding
- ✓ Station skipping
- ✓ Reparto de semáforos



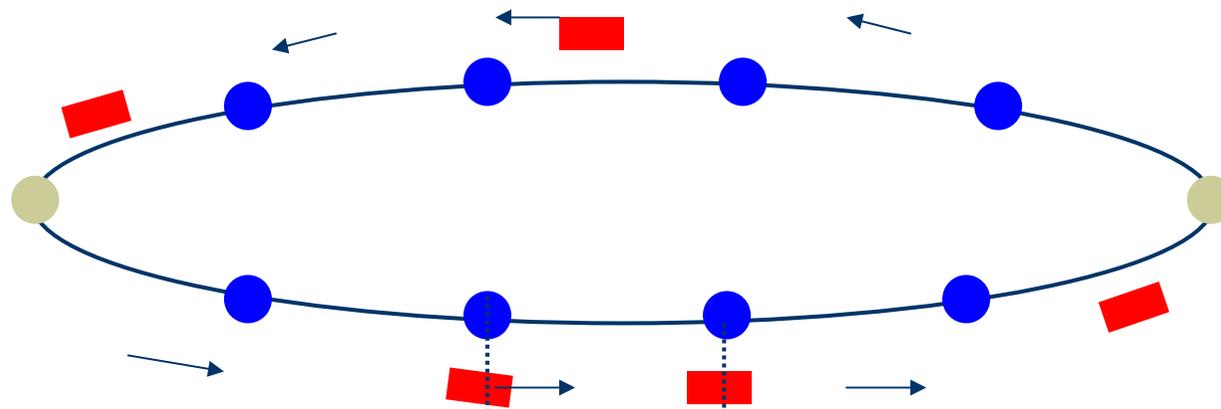
# Sistema de Transporte Público



Se define instante  $k$

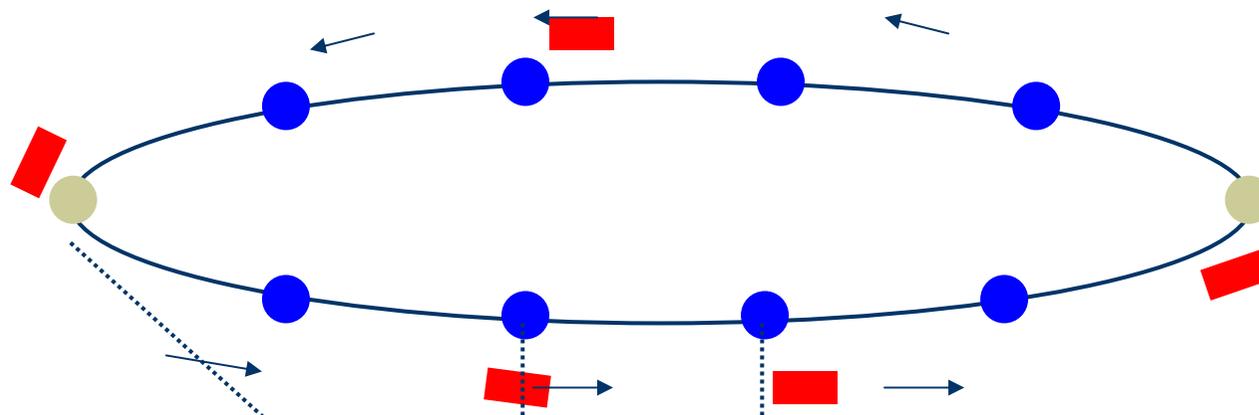
Simulación de Eventos  
(llegada de buses a un paradero o un semáforo)

# Sistema de Transporte Público



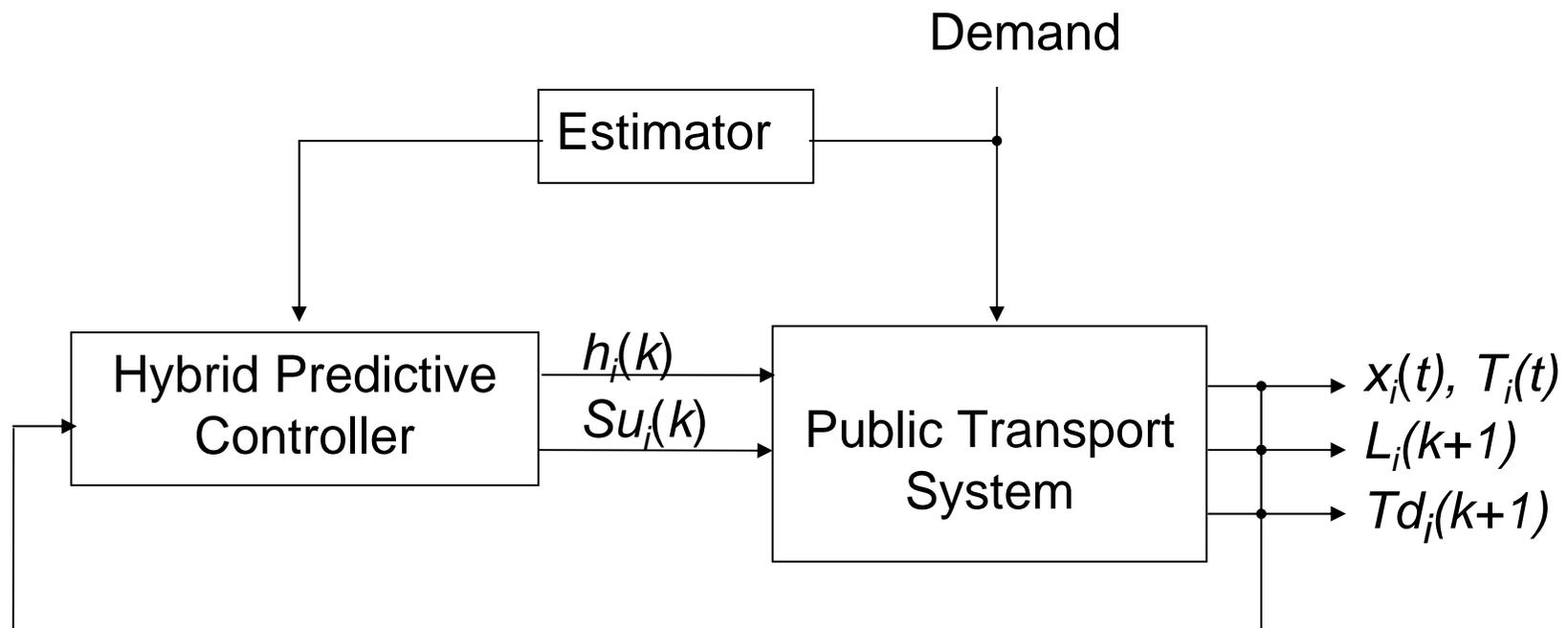
Se define instante  $k+1$

# Sistema de Transporte Público



Se define instante  $k+2$

# Control Predictivo



# Control Predictivo

Tiempo de espera promedio en un paradero

Regularizar frecuencia de buses

$$\begin{aligned}
 \underset{u(k)=\{h(k) Su(k)\}}{\text{Min}} \quad J = & \sum_{\ell=1}^{Np} \sum_{i=1}^b \left[ \theta_1 \cdot \hat{H}_i(k+\ell) \hat{L}_s(k+\ell) + \theta_2 \cdot (\hat{H}_i(k+\ell) - \bar{H})^2 + \right. \\
 & \left. + \theta_3 \cdot \hat{L}_i(k+\ell) h_i(k+\ell-1) + \theta_4 \cdot \hat{L}_s(k+\ell) \hat{H}_{i+1}(k+\ell+z) (1 - Su_i(k+\ell-1)) \right]
 \end{aligned}$$

Tiempo de espera de los usuarios que se encuentran en un bus mientras este está detenido realizando holding

Tiempo de espera de los usuarios en un paradero no atendidos por un determinado bus

# Algoritmos Genéticos

Variables manipuladas:

- Holding action 0, 30, 60 and 90 [s] en los buses seleccionados.
- Station skipping . “0” cuando el bus salta la estación y “1” cuando se detiene.

• Codificación GA

$$u(k) \in \left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 30 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 60 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 90 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\}$$

$$\boxed{1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \boxed{2} = \begin{bmatrix} 30 \\ 1 \end{bmatrix}, \boxed{3} = \begin{bmatrix} 60 \\ 1 \end{bmatrix}, \boxed{4} = \begin{bmatrix} 90 \\ 1 \end{bmatrix}, \boxed{5} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

# Algoritmos Genéticos

- ◆ Población

$$\text{Population } i \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \text{Individual 1} \\ \text{Individual 2} \\ \vdots \\ \text{Individual n} \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \boxed{1} \boxed{1} \boxed{2} \boxed{3} \boxed{5} \\ \boxed{2} \boxed{1} \boxed{3} \boxed{3} \boxed{4} \\ \vdots \\ \boxed{4} \boxed{5} \boxed{1} \boxed{2} \boxed{3} \end{pmatrix}$$

## Ejemplo

$$\begin{aligned} \text{Individual 1} &= [u(k) \ u(k+1) \ u(k+2) \ u(k+3) \ u(k+4)]^T \\ &= [\boxed{1} \ \boxed{1} \ \boxed{2} \ \boxed{3} \ \boxed{5}]^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 30 & 60 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

- ◆ GA basado en la función objetivo definida

# Pruebas por Simulación

- ◆ Los parámetros del sistema de transporte público son:
  - 6 buses.
  - Demanda desconocida en paraderos.
  - 10 estaciones equidistantes con estación con holding.
  - Velocidad de buses constante

# Pruebas por Simulación

Weight Factors 01-02-03-04	Prediction Horizon	Waiting Time [min]	Travel Time [min]	Total Time [min]
<b>Open Loop</b>		<b>9.26</b>	<b>9.60</b>	<b>18.87</b>
1-1-0-0	Np=2	5.49	9.41	14.90
	Np=5	5.69	9.40	15.09
	Np=10	5.78	9.70	15.48
1-1-0.005-0	Np=2	7.22	9.62	16.83
	Np=5	5.12	9.67	14.79
	Np=10	5.79	9.80	15.59
1-1-1-0	Np=2	5.44	9.54	14.98
	Np=5	5.00	9.83	14.83
	Np=10	4.91	9.76	14.67
1-1-0-1	Np=2	6.09	10.03	16.12
	Np=5	6.08	10.32	16.40
	Np=10	7.14	10.01	17.15
1-1-0-10	Np=2	6.09	10.03	16.12
	Np=5	6.59	10.19	16.79

**45% de ahorro en tiempos de espera.**

**20% de ahorro en tiempo total**

# Conclusiones

- ◆ Enfoque unificado que permite sistematizar la modelación y solución de problemas dinámicos de transporte
- ◆ Control Predictivo basado en técnicas de inteligencia artificial (Fuzzy clustering, GA, PSO, etc.)
- ◆ La formulación permitió incluir dentro del diseño las predicciones de tanto la demanda futura como de las condiciones de tráfico.

# Conclusiones

- ◆ Transporte Público Ruta fija: Resultados preliminares muestran importantes beneficios en ahorros de tiempos de espera y regularización de intervalos
- ◆ Aplicación toma importancia debido a desarrollo de tecnologías ITS

## Extensiones

- Sistemas con trasbordos: Holding en trasbordos, agregar objetivo de minimizar tiempos de espera totales en trasbordos
- Otras estrategias en tiempo real: inyección de vehículos en bucles o deadheading
- Reparto de semáforos de prioridad para transporte público