



EL7025/EL761/CI6308



Control Inteligente para Problemas
Dinámicos de Transporte

Cristián Cortés, Doris Sáez*

Departamento de Ingeniería Civil - Transporte

*Departamento de Ingeniería Eléctrica

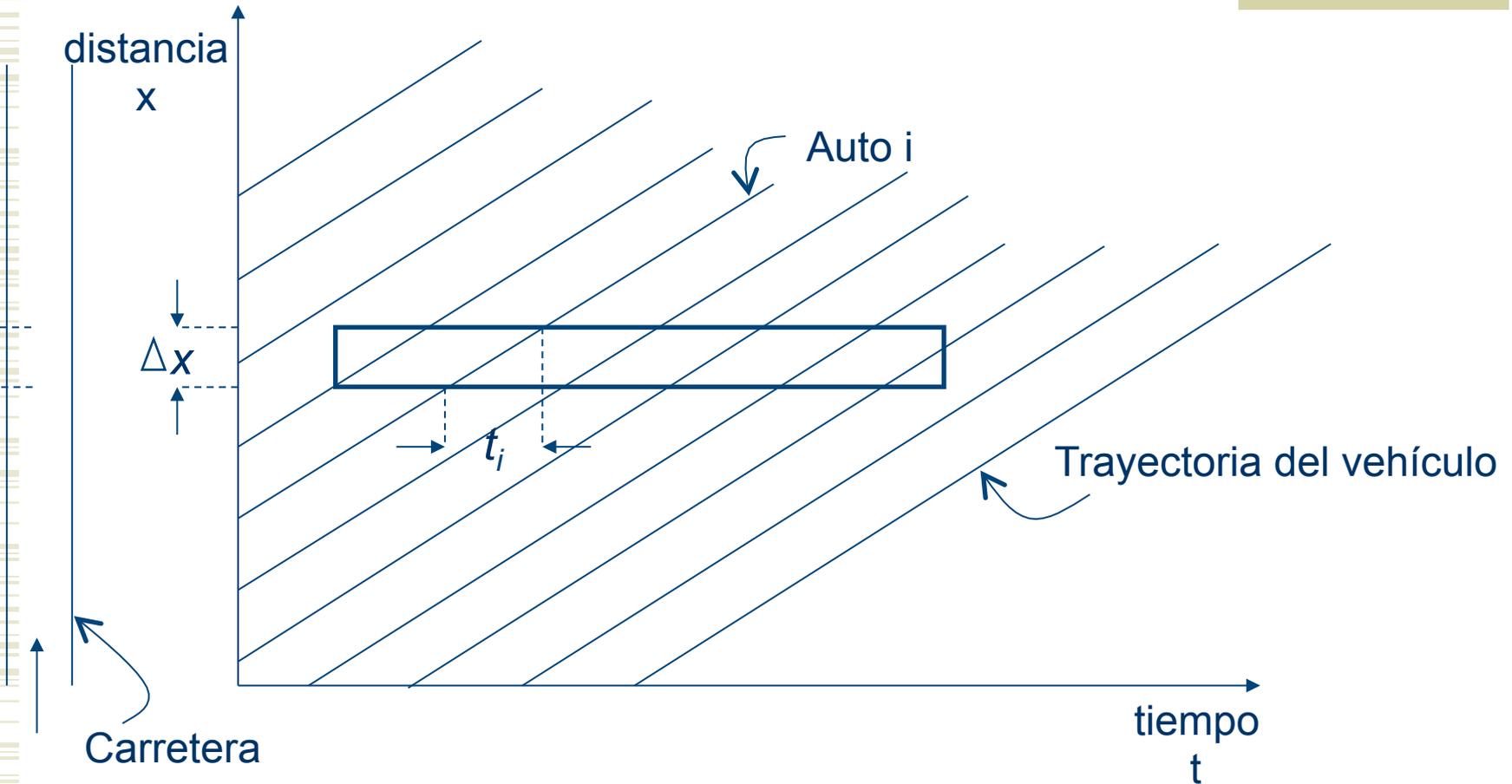
Universidad de Chile

2011

Control de acceso a autopistas (Freeway ramp control)

- ◆ Conceptos básicos de teoría de flujos vehiculares
- ◆ Diagramas fundamentales: relación entre variables
 - Velocidad u (space mean speed)
 - Flujo q (# de vehículos cruzando un punto por unidad de tiempo)
 - Densidad k (vehículos por unidad de distancia)

Conceptos básicos de teoría de tráfico vehicular (mediciones de tráfico)



Conceptos básicos de teoría de tráfico vehicular (mediciones de tráfico)

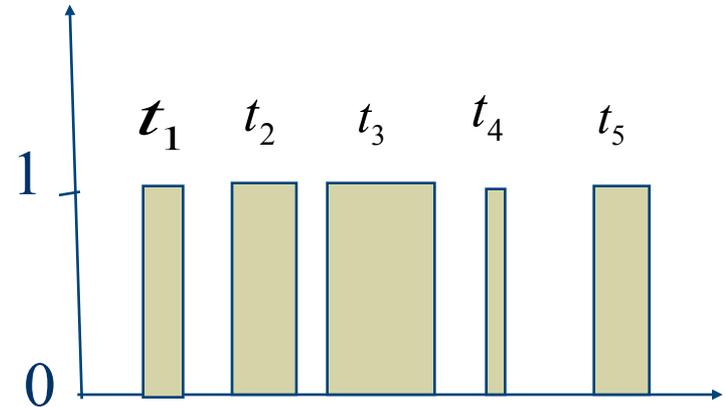
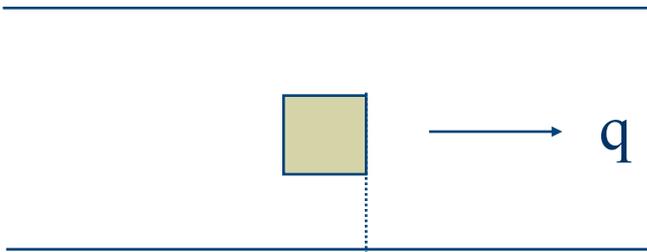
- ◆ Velocidad de auto i :
$$v_i = \frac{\Delta x}{t_i}$$
- ◆ Time mean speed (media aritmética)
$$\bar{v}_{TMS} = \frac{\sum v_i}{n}$$
- ◆ Space mean speed:
$$\bar{v}_{SMS} = \frac{n\Delta x}{\sum_i t_i} = \frac{n}{\sum_i t_i / \Delta x} = \frac{n}{\sum_i 1/v_i}$$

Siempre ocurre que
$$\bar{v}_{SMS} \leq \bar{v}_{TMS}$$

Densidad y ocupación

- ◆ Densidad (concentración): # de vehiculos por unidad de largo de vía (k)
 - No se puede medir directamente en un punto
 - Se puede estimar en forma indirecta a partir de la ocupación de pistas
- ◆ Ocupación de pista: provee una estimación indirecta (pero continua) de k

Ocupación



Ocupación total: $\sum t_i$

Tiempo total de observación : T

Proporción de tiempo ocupado: $\frac{\sum t_i}{T}$

Ocupación:

$$\phi = 100 \frac{\sum t_i}{T} \%$$

Densidad-ocupación

- ◆ Se puede usar ϕ para estimar k
"largo efectivo de vehículo" L_e

$$\bar{u}_{SMS} = \frac{NL_e}{\sum t_i} \text{ ft/sec} \quad k = \frac{q}{\bar{u}_{SMS}} = \frac{N}{T} \frac{\sum t_i}{NL_e} = \frac{\sum t_i}{TL_e} = \frac{1}{L_e} \frac{\sum t_i}{T}$$

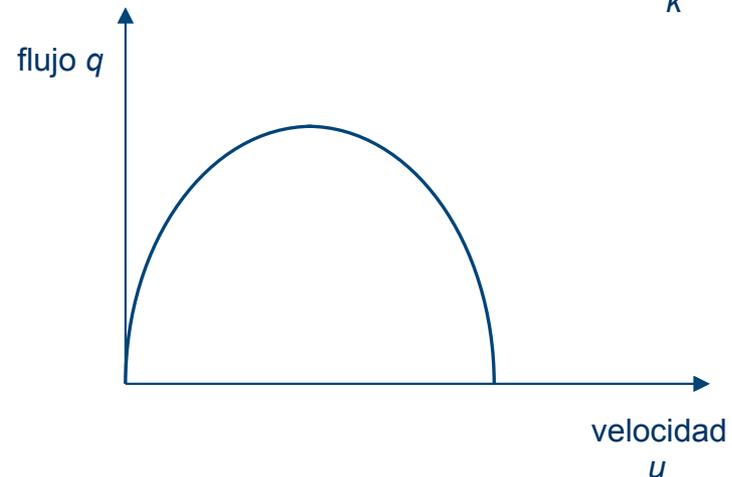
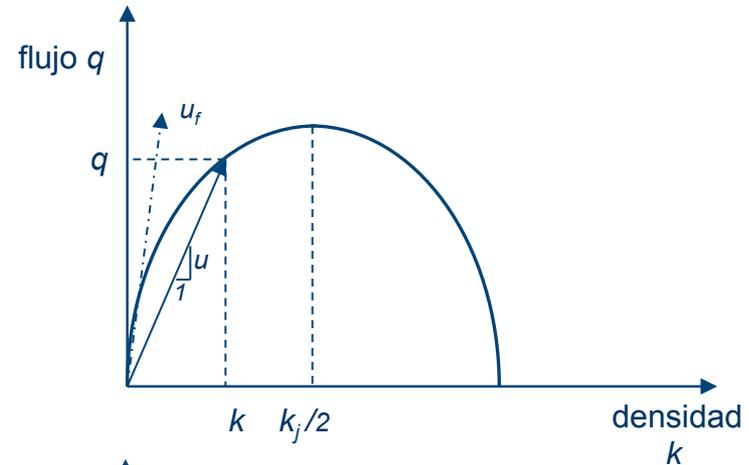
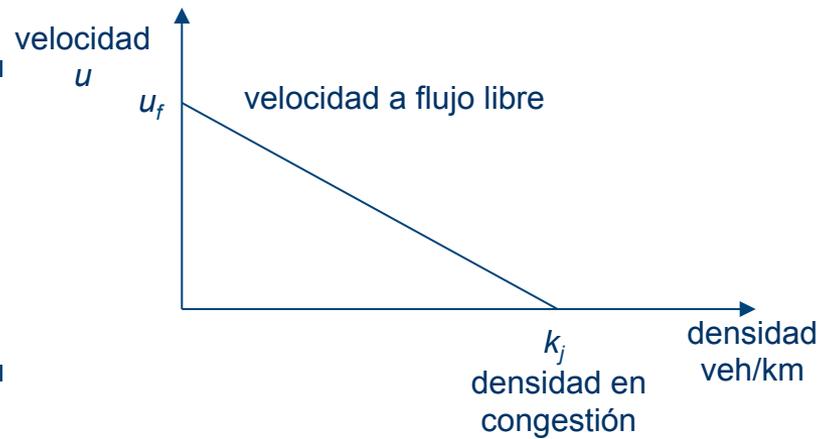
luego

$$k = \frac{1}{L_e} \left(\frac{\phi}{100} \right) \text{ veh/ft}$$

$$k = \frac{5280}{L_e} \left(\frac{\phi}{100} \right) \text{ veh/mile}$$

Conceptos básicos de teoría de tráfico vehicular (diagramas fundamentales)

- ◆ En teoría hidrodinámica, cuando el tráfico se modela como un fluido, u , q y k pueden suponerse como variables conitnuas, definidas en cualquier punto e instante



Conceptos básicos de teoría de tráfico vehicular (diagramas fundamentales)

- ◆ Función candidata para u es la relación velocidad-densidad de Greenshields

$$u = \left(1 - \frac{k}{k_j}\right) u_f$$

u_f : velocidad a flujo libre
 k_j : densidad de congestión

$$q = uk$$

Relación que aplica sobre fluidos continuos, pero se usará para tránsito también, aunque q es definido sobre un período finito de tiempo y k sobre distancia finita

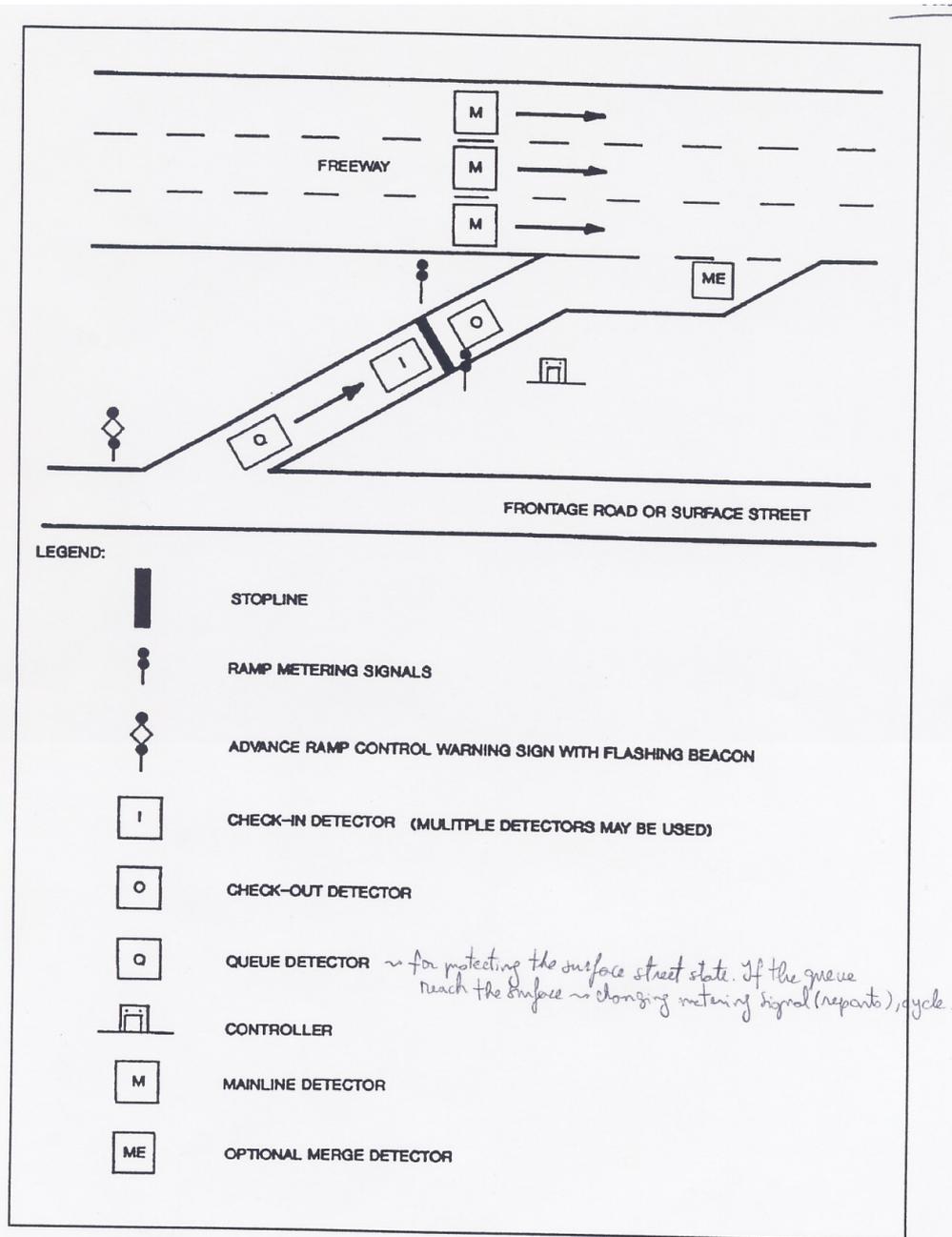


Figure 4-14. Typical entrance ramp metering system layout.

Sistema ramp metering

Table 4-20. Ramp metering components.

Component	Description
<p>Ramp metering signals</p>	<p>Two standard signal displays:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3-section (red-yellow-green) • 2-section (red-green) <p>The MUTCD advises a yellow change interval only when vehicles are released in groups (<i>platoon metering</i>) (20).</p>
<p>Local controller</p>	<p>Current designs often use a type 170 controller (21). Several cabinet arrangements (Model 336C, 334) support ramp metering functions. Special ramp meter control software programs are used in the type 170 controller.</p>
<p>Warning sign</p>	<p>MUTCD requires one or 2 advance ramp control warning signs with flashing beacon. Beacon flashes when ramp metering is active (20).</p>
<p>Check-in (demand) detector</p>	<p>A check-in (or demand) detector is placed on the approach to the ramp metering signal, so that the signal remains red until a vehicle is detected at the stopline, as shown in figure 4-14. When a vehicle is detected by the check-in detector, the ramp metering signal changes to green, provided that minimum red time has elapsed.</p> <p>To minimize the sensitivity of ramp meter operation to the stopping or queuing position of approaching vehicles, 2 or more demand detectors in one lane are sometimes used (12).</p>
<p>Check-out (passage) detector</p>	<p>Many systems use a check-out (or passage) detector to assure single-vehicle entry. After passing the ramp metering signal, a vehicle is detected by the passage detector, installed just beyond (about 8 ft (2.4 m) past) the stopline. When the passage detector senses a vehicle, the green interval terminates. In this way, the green interval allows the passage of only one vehicle.</p>
<p>Queue detector</p>	<p>Many ramp metering systems use one or more queue detectors to prevent ramp traffic from blocking frontage roads or surface streets. Place the queue detector in advance of the ramp metering signal:</p> <ul style="list-style-type: none"> • At a strategic point on the ramp • On the frontage road <p>When the filtered occupancy of the queue detector exceeds a prestored threshold (thus indicating the presence of the queue on this detector), the ramp meter responds by:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Increasing the metering rate • Terminating metering
<p>Merge detector</p>	<p>A detector is sometimes used to sense the presence of vehicles in the primary merging area of the ramp and freeway mainlines.</p>

Control en autopistas: Motivación (freeway ramp control)

- ◆ Objetivo: reducir o eliminar problemas limitando la entrada a autopistas (rampas) tal que la demanda principal sea menos a la capacidad de autopista
- ◆ Tráfico entrante: podría esperar o desviarse
- ◆ Beneficios: disminuir demoras y costos de operación a usuarios de autopistas

Ramp metering: concepts

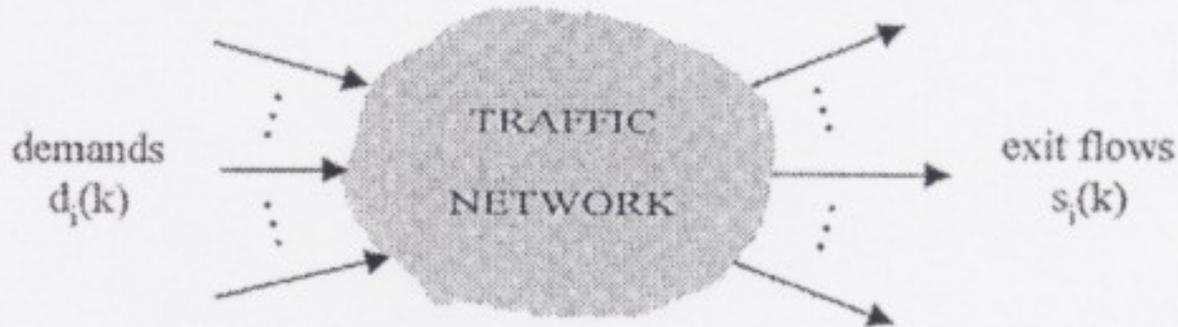


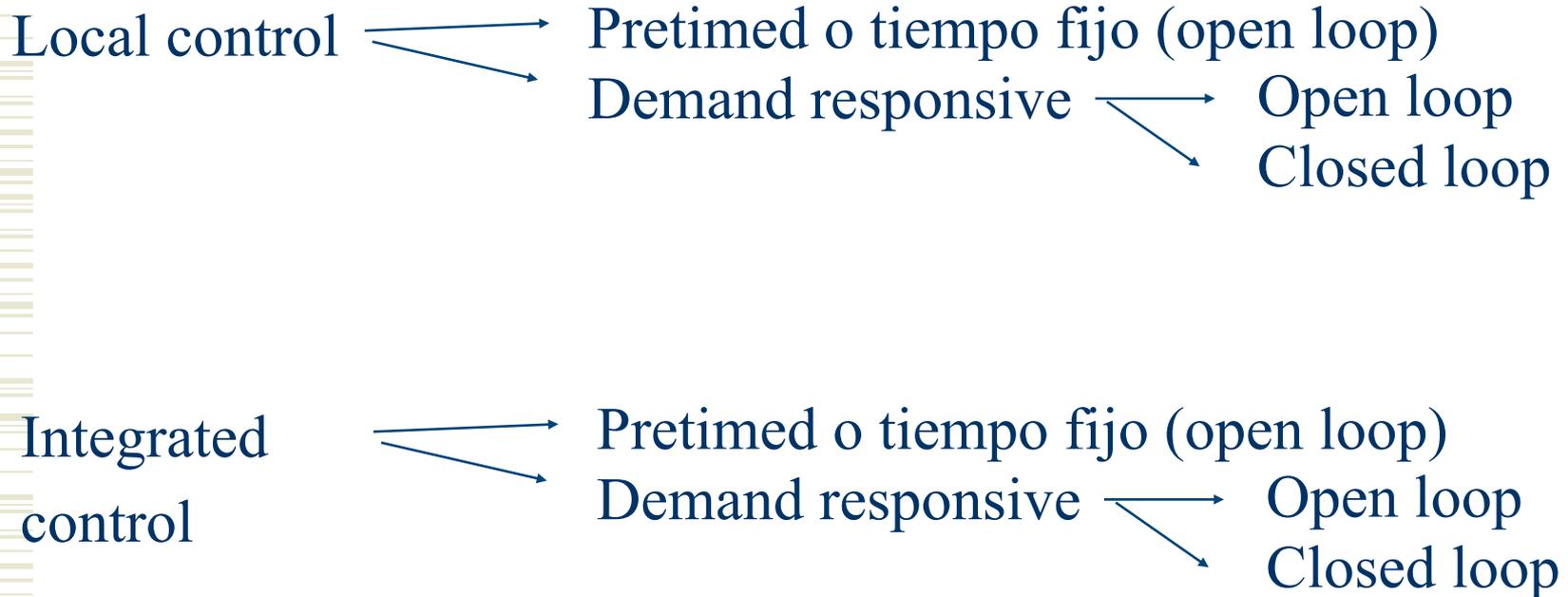
Figure 1: A general traffic network.

$$T_s = T \sum_{k=1}^K N(k) \quad T_s = T \sum_{k=1}^K \left[N(0) + T \sum_{\ell=0}^{k-1} d(\ell) - T \sum_{\ell=0}^{k-1} s(\ell) \right]$$

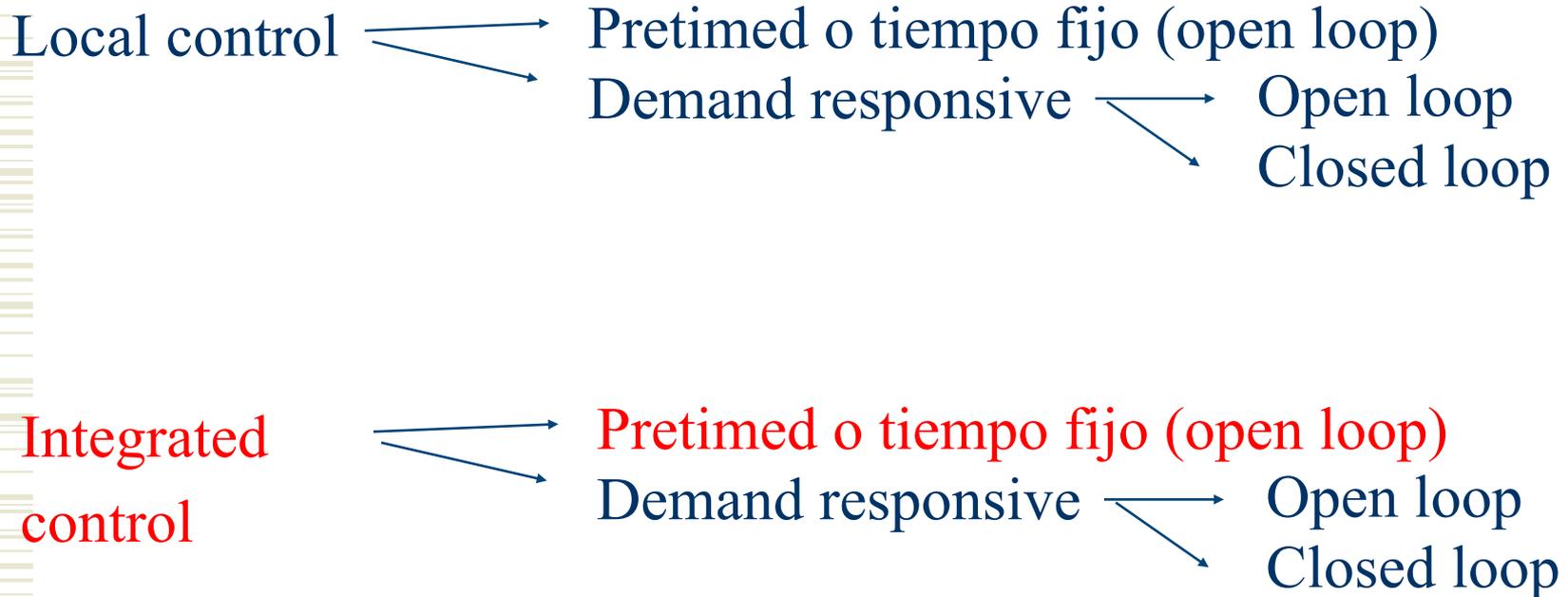
Clasificación de algoritmos de control (freeway ramp control)

- ◆ Control local vs control integrado
- ◆ Tiempo fijo (pretimed) vs demand responsive
- ◆ Open loop vs closed loop control

Clasificación de algoritmos de control (freeway ramp control)



Clasificación de algoritmos de control (freeway ramp control)

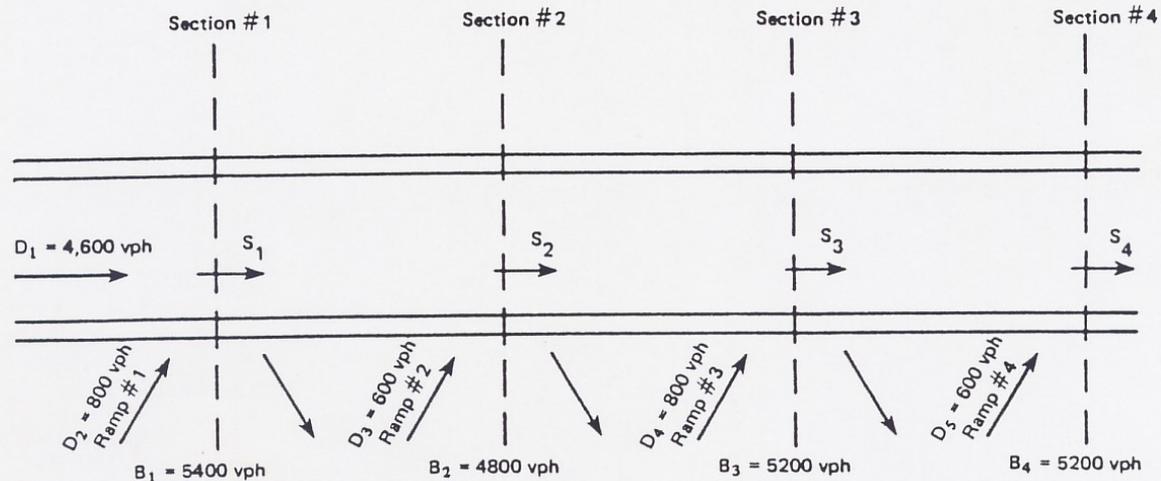


Control de rampas integrado (pretimed)

- ◆ Formulación de Wattleworth
- ◆ Se refiere a control en rampa considerando interdependencia cuando se establece las tasas de entrada
- ◆ Control local en rampa simple puede no ser suficiente para alcanzar reducción de volumen
- ◆ En este caso (pretimed) tasas de entrada se computa con data histórica
 - vía principal + flujos de entrada a rampas
 - Capacidades de autopista inmediatamente aguas abajo de cada rampa de entrada
 - Patrones de tráfico dentro de sección de autopista a ser controlada

Control de rampas integrado (pre-timed)

CONTROL CONCEPTS — FREEWAYS



X_i = allowable volume at input i

D_i = demand at input i

B_j = capacity at section j

A_{ij} = decimal fraction of vehicles entering at input i which pass through section j

S_j = demand at section j

Control de rampas integrado (pretimed)

◆ Formulación de Programación Lineal

$$\text{Max} \sum_i^n X_i$$

$n = \#$ flujos entrantes

s.a.

$$S_j = \sum_i^n X_i A_{ij} \leq B_j \quad j : 1, \dots, n-1$$

Relación demanda-capacidad

$$X_1 = D_1$$

Demanda vía principal

$$X_i \leq D_i \quad i : 1, 2, \dots, n$$

Volumen en rampas máximo permitido
 \leq demanda en rampas

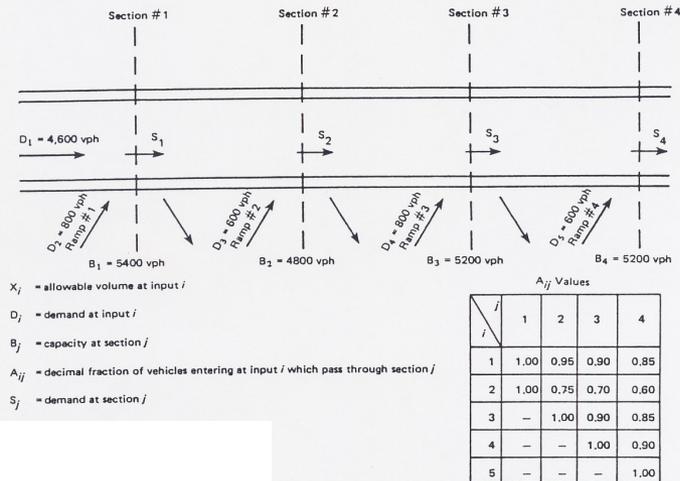
$$X_i \geq x_{i\min} \geq 0$$

Volumen de entrada en rampas \geq
volumen mínimo de metering

Control de rampas integrado (pretimed)

A_{ij} Values

$i \backslash j$	1	2	3	4
1	1.00	0.95	0.90	0.85
2	1.00	0.75	0.70	0.60
3	—	1.00	0.90	0.85
4	—	—	1.00	0.90
5	—	—	—	1.00



Compute X_i 's starting at section #1

- Set $X_1 = D_1 = 4600$ vph
- $S_1 = A_{11}X_1 + A_{21}D_2 = (1.00)(4600) + (1.00)(800) = 5400$ vph = $B_1 = 5400$ vph; $\therefore X_2 = 800$ vph
- $S_2 = A_{12}X_1 + A_{22}X_2 + A_{32}D_3 = (0.95)(4600) + (0.75)(800) + (1.00)(800) = 5570$ vph $> B_2 = 4800$ vph;
 $\therefore X_3 = 0$ and volume entering upstream must be reduced by 170 vph;
 $\therefore X_2 = 800 - 170/A_{22} = 800 - 170/0.75 = 573$ vph
- $S_3 = A_{13}X_1 + A_{23}X_2 + A_{33}X_3 + A_{43}D_4 = (0.90)(4600) + (0.70)(573) + (0.90)(0) + (1.00)(800) = 5341$ vph $> B_3 = 5200$ vph; $\therefore X_4 = 659$ vph
- $S_4 = A_{14}X_1 + A_{24}X_2 + A_{34}X_3 + A_{44}X_4 + A_{54}D_5 = (0.85)(4600) + (0.60)(573) + (0.85)(0) + (0.90)(659) + (1.00)(800) = 5447$ vph $> B_4 = 5200$ vph; $\therefore X_5 = 353$ vph

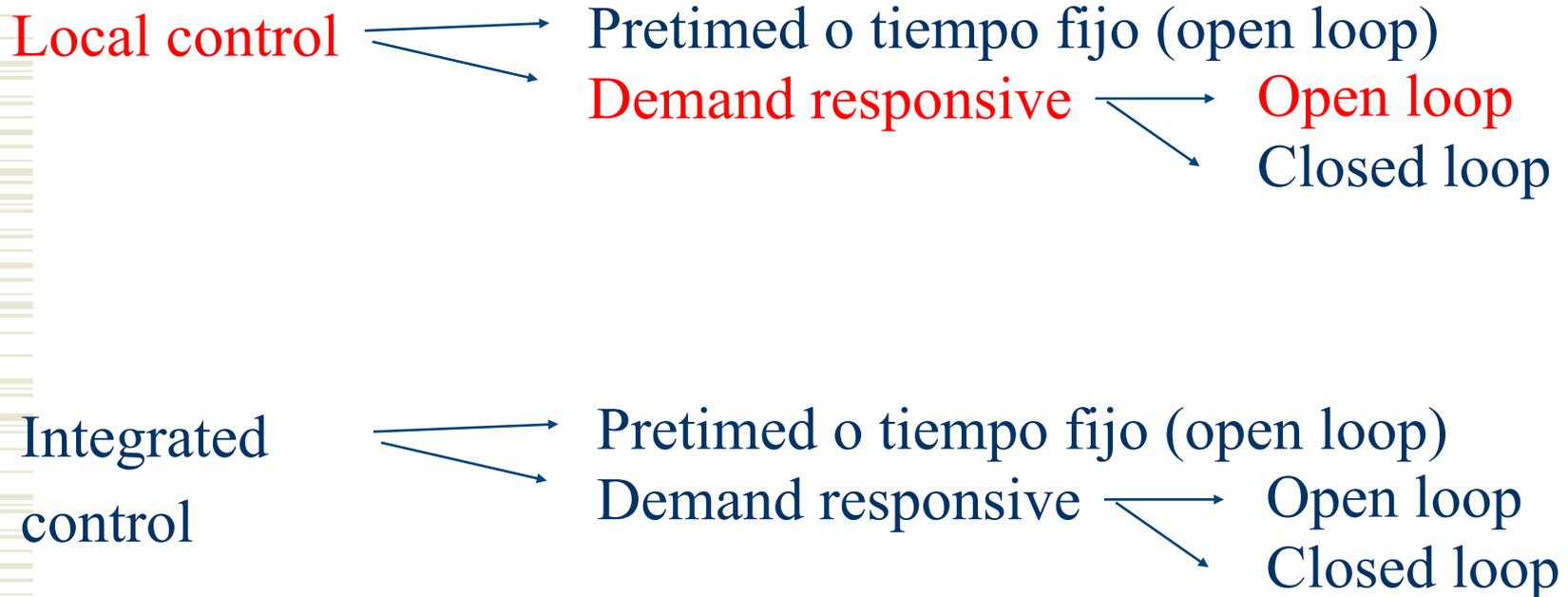
Conclusion:

- Ramp #1: Meter at a rate of 573 vph.
- Ramp #2: Close.
- Ramp #3: Meter at a rate of 659 vph.
- Ramp #4: Meter at a rate of 353 vph.

Consideraciones adicionales

- ◆ No se requiere usar SIMPLEX, ya que $A_{11}=1$ y $A_{ij}=0$ para $j < I$
- ◆ Se puede agregar también restricciones de tamaño de cola (restr. 3): establecer tasas para varios periodos de tiempo usando restricciones de máximo largo de cola
- ◆ Problema de fixed-time strategies: no se considera data en tiempo real: simplificación gruesa
 - Demandas no son constantes a lo largo del día
 - Demandas pueden variar de día a día
 - Demandas cambian en el largo plazo
 - Porciones A_{ij} también cambian de la misma forma que las demandas (podrían cambiar tb. Debido a la respuesta de los motoristas entrantes)
 - Incidentes provocan perturbaciones imposibles de captar con esta metodología

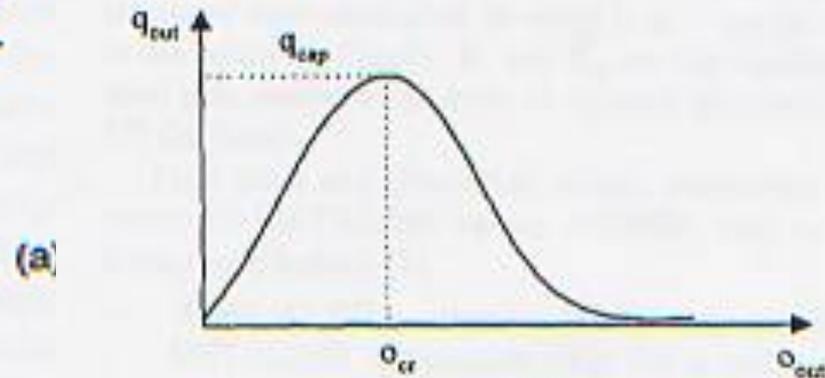
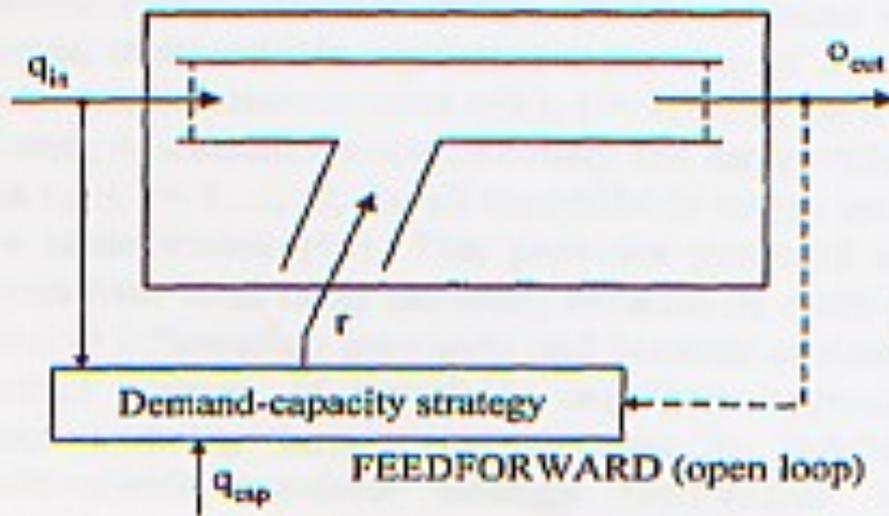
Clasificación de algoritmos de control (freeway ramp control)



Estrategias de ramp metering reactivas: Ramp metering local

- ◆ Estrategia demanda-capacidad

$$r(k) = \begin{cases} q_{cap} - q_{in}(k-1) & \text{si } o_{out}(k) \leq o_{cr} \\ r_{min} & \text{si no} \end{cases}$$



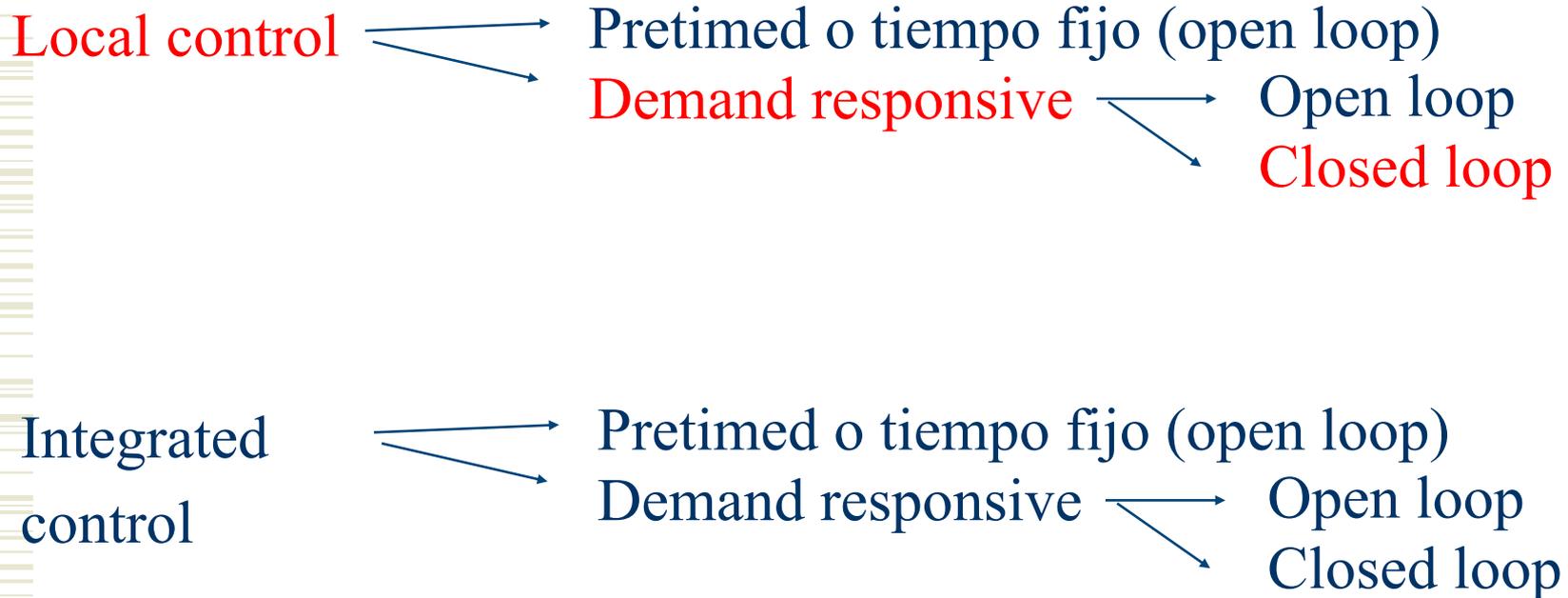
Estrategias de ramp metering reactivas: Ramp metering local

◆ Estrategia demanda-capacidad

$$r(k) = \begin{cases} q_{cap} - q_{in}(k-1) & \text{si } o_{out}(k) \leq o_{cr} \\ r_{min} & \text{si no} \end{cases}$$

- Se trata de agregar al flujo medido aguas arriba $q_{in}(k-1)$ tanto flujo en rampa $r(k)$ como se pueda para alcanzar capacidad de autopista aguas abajo q_{cap}
- Si $o_{out}(k)$ alcanza niveles críticos, se reduce el flujo en rampa al mínimo para disolver congestión
- Open-loop disturbance rejection policy
- Occupancy strategy: basada en misma filosofía, pero se basa en estimaciones basadas en ocupación de q_{in} (podría bajar costo de implementación eventualmente)

Clasificación de algoritmos de control (freeway ramp control)



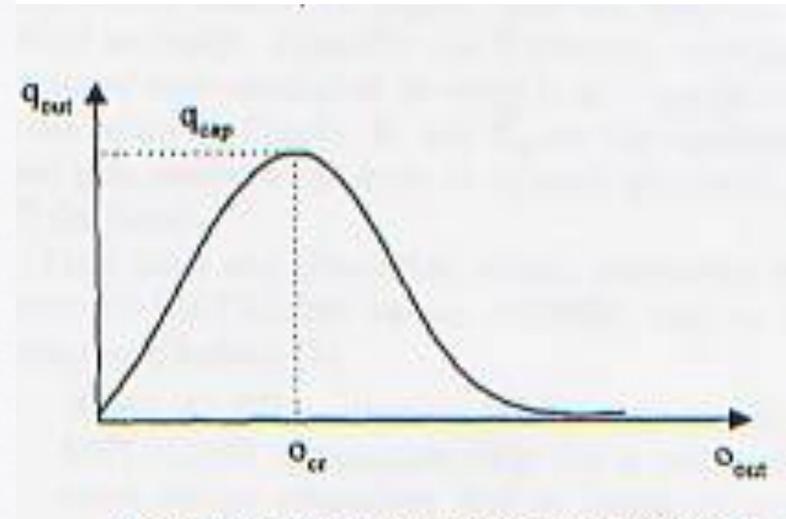
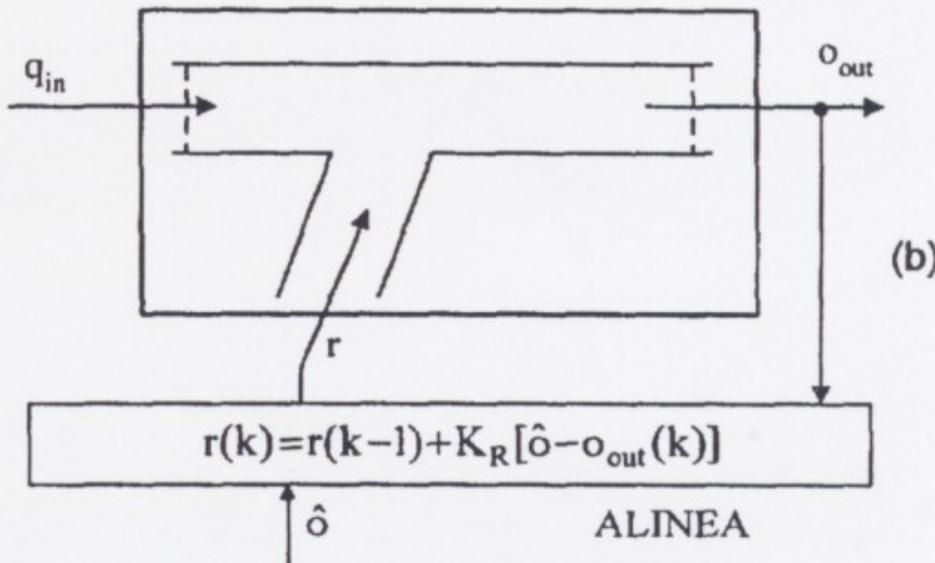
Estrategias de ramp metering reactivas: Ramp metering local

- ◆ ALINEA (closed loop)

$$r(k) = r(k-1) + K_R (\hat{o} - o_{out}(k))$$

$$K_R > 0$$

Parámetro regulador



Estrategias de ramp metering reactivas: Ramp metering local

◆ ALINEA (closed loop)

$$K_R > 0$$

$$r(k) = r(k-1) + K_R (\hat{o} - o_{out}(k))$$

Parámetro regulador

- Valor deseado para ocupación aguas abajo \hat{o}
- Típico, pero no necesario $\hat{o} = o_{cr}$ en cuyo caso flujo aguas abajo se acerca a capacidad q_{cap}
- Experiencias en terreno: ALINEA no ha sido muy sensible respecto de la elección de K_R
- ALINEA reacciona en forma más suave que DR: mejor en prevenir congestión estabilizando flujo a un nivel de rendimiento máximo
- Estado estacionario: si q_{in} es constante, entonces $o_{out}(k) = \hat{o}$
- Valor \hat{o} puede cambiar en cualquier instante, así ALINEA puede entrar en un sistema jerárquico de control que ajuste valores individuales de rampas en tiempo real basado en nivel superior de coordinación

Estrategias de ramp metering reactivas: Ramp metering local

- ◆ ALINEA (closed loop) : determinación de repartos

$$g = (r/r_{sat}) \cdot c$$

$$K_R' = K_R c/r_{sat}$$

$$g(k) = g(k-1) + K_R' (\hat{o} - o_{out}(k))$$

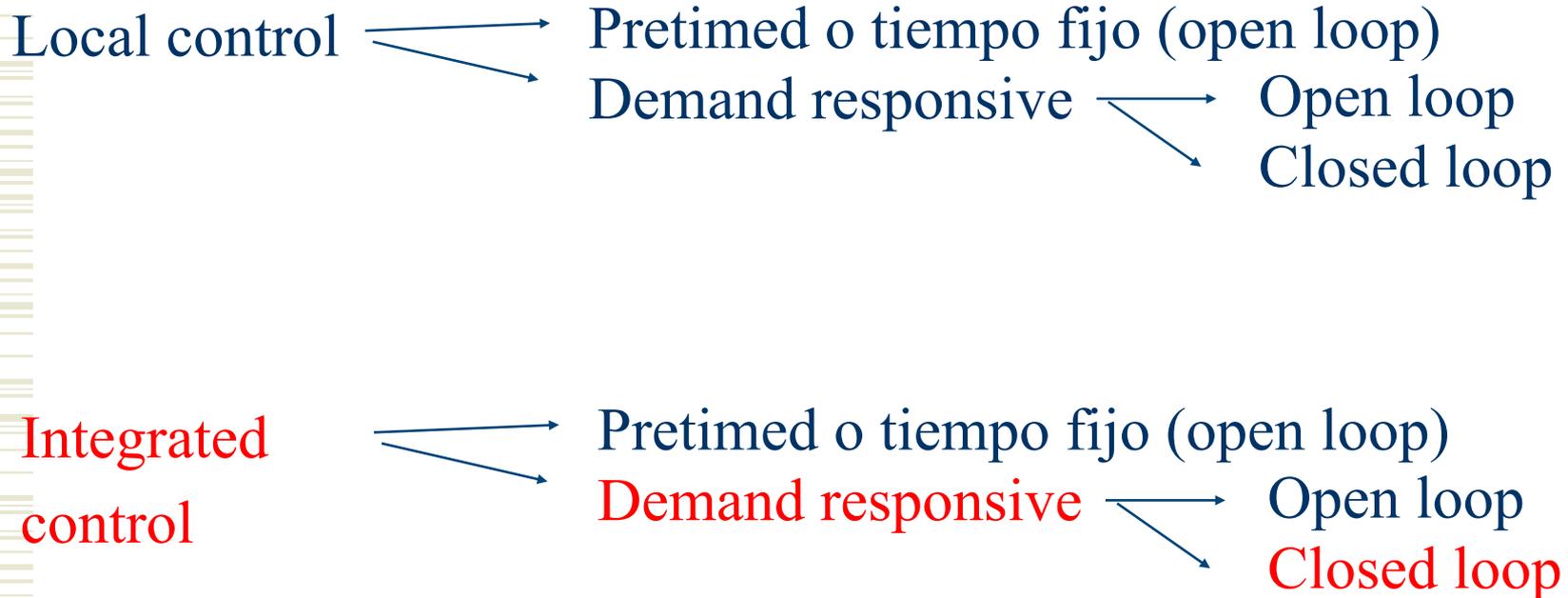
$$g \in [g_{min}, g_{max}] \quad \text{donde } g_{min} > 0 \quad \text{y} \quad g_{max} \leq c$$

- Si se permite que pase sólo un vehículo por verde, se ajusta verde para que pase sólo un vehículo y volumen en rampa r es controlado variando la fase en rojo entre valores acotados (red_min , red_max)
- Valores $r(k-1)$ o $g(k-1)$ acotados provenientes del paso previo ($gmin$, $gmax$)

Estrategias de ramp metering reactivas: Ramp metering local

- ◆ ALINEA (closed loop)
 - Si cola de vehs. en rampa se incrementa excesivamente (identificado por detectores localizados apropiadamente) manualmente se permite al regulador ingresar más vehs. a la autopista para disminuir la cola en rampa
 - ALINEA a nivel local funciona muy bien, en términos de cualquier medida de rendimiento (tiempo total gastado, distancia total viajada, velocidad media, duración de congestión (diaria)), incluso mejor que algunos esfuerzos por sofisticar estrategias integradas online mejoras en tiempo total gastado alrededor de 20%)
 - Conceptos de control: diseño de regulador lineal (linear quadratic LQ feedback law)
 - Se ha extendido a control a nivel de sistema

Clasificación de algoritmos de control (freeway ramp control)



Estrategias de regulación multivariadas

◆ METALINE (closed loop)

- Se persigue los mismos objetivos de estrategias ramp-metering locales
- Se trata de operar la autopista en condiciones de tráfico cerca de valores pre especificados (deseados)
- Se utiliza todas las medidas de la vía principal $o_i(k), i:1, \dots, n$ en un segmento de autopista para calcular simultáneamente los volúmenes en rampas controlables del segmento $r_i(k), i = 1, \dots, m$ en forma simultánea
- Mejoras a control local debido a mejor provisión de información y por acciones de control coordinadas

Estrategias de regulación multivariadas

◆ METALINE (closed loop)

$o_i(k), i : 1, \dots, n$ Vector de mediciones en autopista

$r_i(k), i : 1, \dots, m$ Vector de m volúmenes controlables on-ramp

$$r(k) = r(k-1) - K_1[o(k) - o(k-1)] + K_2[\hat{O} - O(k)]$$

$$o = [o_1, \dots, o_n]^T \quad O = [O_1, \dots, O_m]^T \quad \hat{O} = [\hat{O}_1, \dots, \hat{O}_m]^T$$

- O es subconjunto de o que incluye m lugares donde hay valores preespecificados de ocupación \hat{O}
- Número de puntos ocupaciones deseadas no puede ser mayor que las rampas controladas (típico cuello de botella aguas abajo de cada rampa seleccionado para ingresar a O)
- K_1, K_2 : matrices reguladoras a ser cuidadosamente diseñadas

Comparación eficiencia METALINE - ALINEA

- ◆ Mientras ALINEA no requiere mucho esfuerzo de diseño, METALINE requiere procedimiento más sofisticado de diseño basado en métodos avanzados teóricos de control (LQ optimal control)
- ◆ Para autopistas urbanas con alta densidad en *on-ramps*, METALINE no parece mostrar ventajas sobre ALINEA (implementado independientemente en todas las rampas controladas)
- ◆ En el caso de congestión no recurrente (incidente), METALINE funciona mejor que ALINEA, debido a información medida integrada más razonable

Ramp metering debiera provocar un impacto positivo tanto en autopista como en vías alternativas (autopista permite mayor rendimiento permitiendo atraer más usuarios de vías urbanas: premisa confirmada en terreno en aplicaciones importantes)

Estrategias no lineales para optimizar *ramp metering*

- ◆ Para redes o bien largos segmentos de autopistas es necesario un nivel de coordinación superior que computa, en tiempo real, valores de referencia óptimos (justos) bajo una óptica proactiva y estratégica
- ◆ Tal estrategia debe incluir
 - El estado actual de tráfico (autopista y *on-ramps*)
 - Predicciones de demanda sobre un horizonte suficientemente largo
 - La capacidad limitada de almacenamiento en *on-ramps*
 - Restricciones de *ramp metering* discutidas hasta ahora
 - Dinámica de flujo no lineal, incluyendo capacidad limitada de infraestructura
 - Cualquier incidente que ocurra en la red de autopistas

Estrategias no lineales para optimizar *ramp metering*

- ◆ Basándose en tal información, la estrategia de control debiera entregar valores para toda la red de autopistas sobre un horizonte de tiempo futuro tal que:
 - Se respeten todas las restricciones presentes
 - Se minimice una función objetivo, por ejemplo: el tiempo total en la red completa (incluyendo *on ramps*)
- ◆ Tal problema de control óptimo dinámico puede ser formulado y resuelto en tiempo computacional moderado usando algoritmos apropiados

Estrategias no lineales para optimizar *ramp metering*

- ◆ La dinámica no lineal de tráfico puede ser expresada a través de modelos dinámicos de la forma

$$x(k+1) = f[x(k), r(k), d(k)]$$

donde

x: vector de estado que comprende todas las densidades de tráfico y velocidades medias (espaciales) en secciones de 500 mts. de longitud, así como colas en rampas

r: comprende todos los volúmenes en rampa controlables

d: vector de disturbances que comprende demandas *on-ramp* y tasas de viraje (en bifurcaciones o en *off-ramps*)

Estrategias no lineales para optimizar *ramp metering*

- ◆ Así, dado un estado inicial (de mediciones o estimaciones), $\mathbf{x}(0)$, y dadas las predicciones de demanda $d(k)$, $k = 0, \dots, K - 1$
- ◆ El problema es minimizar el tiempo total en todo el sistema sobre un horizonte de tiempo K , sujeto a restricciones dadas por la no linealidad de la dinámica de tráfico, así como restricciones de capacidad en rampas y largos de cola máximos permitidos, analíticamente:

Estrategias no lineales para optimizar *ramp metering*

$$\underset{r(k):k=0,\dots,K-1}{\text{Min}} T_s = T \sum_{k=0}^{K-1} \left[\sum_{i=1}^n \rho_i(k) \cdot \Delta_i + \sum_{i=1}^m l_i(k) \right]$$

s.a.

$$x(k+1) = f[x(k), r(k), d(k)]$$

$$r_{j,\min} \leq r_j(k) \leq \min \{ r_{j,\max}, d_j(k) \}$$

$$l_i(k) \leq l_{i,\max}$$

donde

$\rho_i(k)$: densidad de tráfico (en veh/km) en segmento i en tiempo kT

$l_i(k)$: largos de cola (en vehs.)

Estrategias integradas de control de tráfico en redes de autopistas

- Extensión adecuada del enfoque de control óptimo discutido anteriormente.
- Modelo dinámico de tráfico puede extenderse para permitir otras medidas de control, más allá de tasas de metering $r(k)$
- Formalmente:

$$x(k+1) = f[x(k), u(k), d(k)]$$

donde $u(k)$ comprende medidas de control de todo tipo

- Ejemplo de aplicación del enfoque *AMOC*, donde ramp metering y route guidance se consideran en conjunto obteniéndose resultados promisorios