

INTRODUCCIÓN

- Los organismos o empresas encargados de administrar y mantener las autopistas y puentes de cuota requieren de una infraestructura donde los usuarios que hacen uso de las autopistas o puentes puedan cubrir el peaje, que es el monto que se paga por ese derecho.
- La formación de filas es una característica de las plazas de cobro que es causada por una serie de elementos de la misma plaza de cobro y determina el factor principal de una buena o mala experiencia para el usuario: el tiempo de cruce por la plaza de cobro.
- Los sistemas de simulación actuales no incluyen el aspecto humano de la toma de decisión de elegir un carril, mantenerse en él o cambiar previendo una posible ventaja.

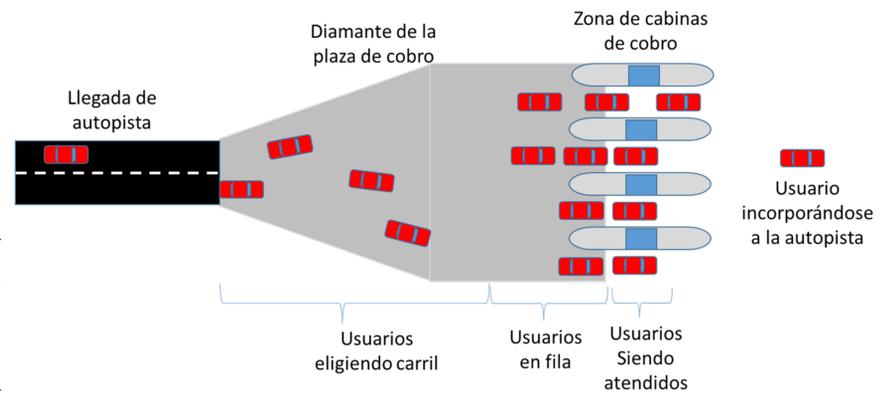
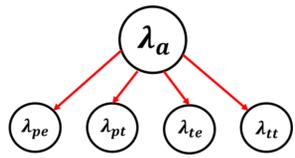


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UNA PLAZA DE COBRO

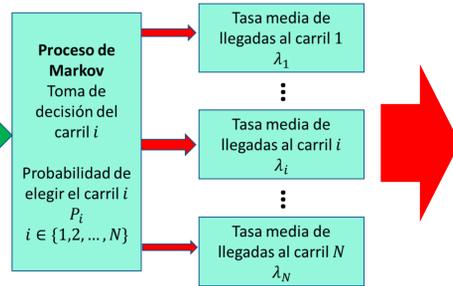
OBJETIVOS

- Proveer un modelo matemático de una plaza de cobro que constituya una herramienta para el análisis de las causas de la formación de colas.
- Uso de los procesos estocásticos, en particular cadenas de Markov, para modelar el proceso de toma de decisión que realizan los usuarios

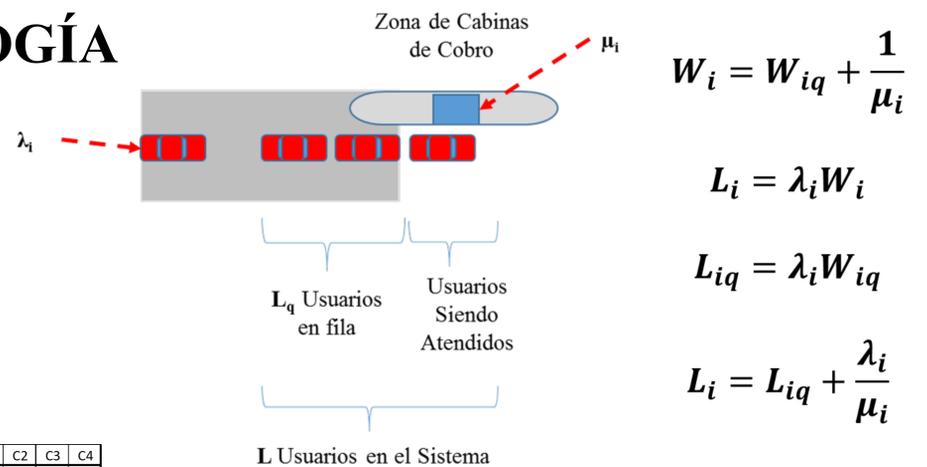
Se estudia el proceso de llegadas de los usuarios y su composición por categoría vehicular [usuario particular (P) o usuario Transportista (T)] y su forma de pago [Efectivo (e) o Telepeaje (t)]



Tasa media de llegadas a la plaza de cobro λ_a



METODOLOGÍA



MODELO DE COLAS DE UN CARRIL

Se analiza el proceso de elección de carril generando una cadena de Markov con los posibles estados a partir de un Generador de Eventos (GE) que es la tasa de llegada y a partir de ahí las decisiones de elección inicial de carril, permanecer en carril o cambiar

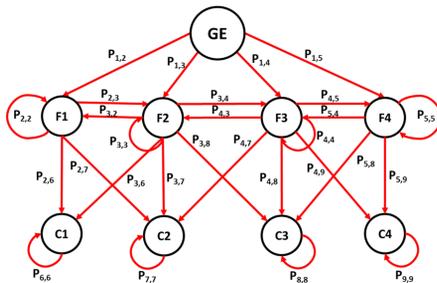


DIAGRAMA DE ESTADOS

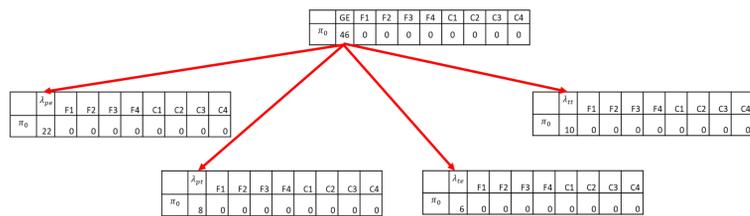
| P | GE | F1 | F2 | F3 | F4 | C1 | C2 | C3 | C4 |
|----|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| GE | 0 | $P_{1,2}$ | $P_{1,3}$ | $P_{1,4}$ | $P_{1,5}$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| f1 | 0 | $P_{2,2}$ | $P_{2,3}$ | 0 | 0 | $P_{2,6}$ | $P_{2,7}$ | 0 | 0 |
| f2 | 0 | $P_{3,2}$ | $P_{3,3}$ | $P_{3,4}$ | 0 | $P_{3,6}$ | $P_{3,7}$ | $P_{3,8}$ | 0 |
| f3 | 0 | 0 | $P_{4,3}$ | $P_{4,4}$ | $P_{4,5}$ | 0 | $P_{4,7}$ | $P_{4,8}$ | $P_{4,9}$ |
| f4 | 0 | 0 | 0 | $P_{5,4}$ | $P_{5,5}$ | 0 | 0 | $P_{5,8}$ | $P_{5,9}$ |
| C1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $P_{6,6}$ | 0 | 0 | 0 |
| C2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $P_{7,7}$ | 0 | 0 |
| C3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $P_{8,8}$ | 0 |
| C4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $P_{9,9}$ |

MATRIZ DE TRANSICIONES

Por medio de la Matriz de Transición y aplicando la convergencia que se presenta en las cadenas de Markov obtenemos, a partir del vector de estados iniciales, lo que representa el estado en que se estabilizará el modelo.

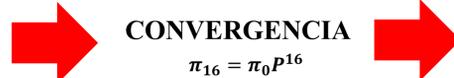
$$\pi_n = \pi_0 P^n$$

VECTORES DE ESTADOS INICIALES



Se verifica el modelo con una plaza de cobro de 4 carriles, tal como se muestra en la sección de METODOLOGÍA y se distribuyen los tipos de usuarios y formas de pago buscando apearse a las estadísticas nacionales.

RESULTADOS



CONVERGENCIA
 $\pi_{16} = \pi_0 P^{16}$

| λ_a | F1 | F2 | F3 | F4 | C1 | C2 | C3 | C4 | Suma | |
|-------------|----|----|----|----|----|-----|------|------|------|----|
| π_{16} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7.2 | 16.2 | 12.7 | 9.92 | 46 |

Se utiliza la matriz de transiciones obtenida durante el estudio de los procesos de elección de carril con los valores obtenidos en campo y el resultado muestra que hay una tendencia a formar filas en los carriles centrales y a subutilizar el carril automático.



CONVERGENCIA
 $\pi_{16} = \pi_0 P^{16}$

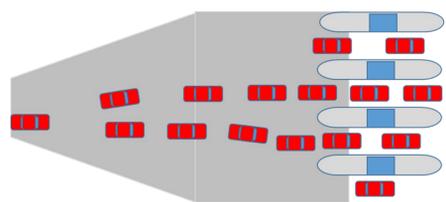
| λ_a | F1 | F2 | F3 | F4 | C1 | C2 | C3 | C4 | Suma | |
|-------------|----|----|----|----|----|-------|-------|-------|-------|----|
| π_{16} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10.38 | 12.08 | 12.77 | 10.77 | 46 |

Se utiliza la matriz de transiciones realizando mejoras en los procesos de elección de carril y se observa que una elección inicial de carril tiene un impacto importante en la formación de filas.

| Carril | Tasa de Llegada λ_i | Tasa de Atención μ_i | Factor de Utilización ρ_i | Usuarios en Fila L_i | Tiempo de Espera (minutos) W_i |
|--------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| 1 | 7.2 | 16 | 0.45 | -8.8 | 0 |
| 2 | 16.2 | 10 | 1.62 | 6.2 | 0.38 |
| 3 | 12.7 | 10 | 1.27 | 2.7 | 0.21 |
| 4 | 9.92 | 10 | 0.99 | -0.1 | 0 |

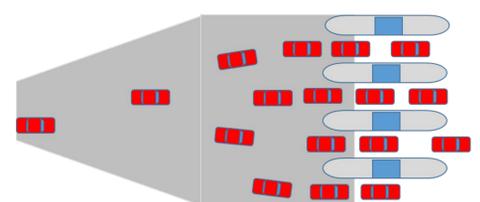
| Carril | Tasa de Llegada λ_i | Tasa de Atención μ_i | Factor de Utilización ρ_i | Usuarios en Fila L_i | Tiempo de Espera (minutos) W_i |
|--------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| 1 | 10.38 | 16 | 0.649 | -5.62 | 0 |
| 2 | 12.08 | 10 | 1.208 | 2.08 | 0.17 |
| 3 | 12.77 | 10 | 1.277 | 2.77 | 0.22 |
| 4 | 10.77 | 10 | 1.077 | 0.77 | 0.07 |

CONCLUSIONES



A) FORMACIÓN DE FILAS

El modelar las decisiones de los usuarios permite analizar su comportamiento ante diferentes elementos de la plaza de cobro y estar en posibilidades de pasar del escenario A) donde el usuario simplemente se forma detrás del que ya está en la fila, a una distribución más eficiente que permite usar todos los carriles disponibles, como se muestra en el escenario B).



B) CON USO EFICIENTE DE CARRILES