

UN PROGRAMA GRAFICO PARA REPRESENTAR EL EFECTO
DE LA PROGRAMACION DE UN SEMAFORO DE DOS FASES SOBRE LA DEMORA

Alvaro Saavedra
Dept. Inversiones ODEPLAN
Secretaría Ejecutiva Comisión de Transporte Urbano

RESUMEN

Allsop (2) demostró que si la demora en una intersección semaforizada controlada por un semáforo de tiempo fijo es estimada mediante Webster (4), entonces el cálculo del reparto que minimiza la demora puede expresarse como un problema de optimización matemática, teniendo éste solución única. Similarmente el cálculo del reparto que maximiza la capacidad puede expresarse como un problema de programación lineal (3).

Para calcular el reparto, un máximo puede ser especificado para la duración del ciclo y a su vez tiempos mínimos durante los cuales ciertos flujos (arcos) tengan derecho a vía. Estas son restricciones que el ingeniero de tráfico usualmente impone sobre el reparto.

En casos simples las restricciones impuestas sobre el reparto pueden ser representadas diagramáticamente, como también la forma en que la demora estimada- por unidad de tiempo para todo el tráfico que pasa a través de la intersección, varía con el reparto. Los puntos representando el reparto que maximiza la capacidad y el que minimiza la demora pueden incluirse en el mismo diagrama.

Dentro de este marco, el objetivo del trabajo -que aquí se describe- fue el desarrollar un programa de computación con capacidad gráfica, que permita al usuario, de un modo interactivo (en la entrada de datos), dibujar los diagramas previamente mencionados.

1. Introducción^{1/}

Independiente de la estrategia de control a seguir, habrán dos objetivos diferentes que alcanzar, cuando se trate de intersecciones aisladas controladas por un semáforo. El primero y más comúnmente usado es programar el tiempo de ciclo y reparto que minimicen la demora en la intersección de acuerdo a alguna expresión para ella. El segundo será programar aquellos tiempos que maximicen la capacidad de la intersección como un todo. Este último criterio es usado cuando la intersección está saturada durante los períodos puntuales.

En aquellos casos donde, ya sea se use un controlador de tiempo fijo o bien uno activado por los vehículos, será útil tener un método conciso para comparar en función del objetivo elegido, las posibles alternativas de tiempos a programar en el controlador.

En casos simples se puede producir un diagrama que para diferentes tiempos en el controlador (ciclo y reparto) muestre la demora asociada, conjuntamente con los valores límites para esos tiempos, de acuerdo a las características de la intersección y del flujo demandante.

En estos términos el objetivo del trabajo fue el desarrollar un programa computacional con la capacidad de dibujar el diagrama antes mencionado, para intersecciones de dos fases. En tales casos el diagrama será en dos dimensiones y la teoría es la descrita en las referencias (1) y (2).

2. Especificaciones mínimas

Para precisar el objetivo en términos prácticos, se especificaron las características del programa computacional a desarrollar. Estas se describen a continuación:

- a) Ser interactivo en la entrada de datos. Es decir, el programa debía preguntar por cada uno de los datos necesarios para el cálculo, presentando un mensaje apropiado.
- b) Reconocer errores en la entrada de datos. Debía verificar y validar los datos, de acuerdo a los estándares usuales para este tipo de datos.
- c) Ejecutarse sólo si el proceso de verificación y validación de los datos se completaba satisfactoriamente.
- d) Ser capaz de dibujar, tanto en pantalla gráfica como en impresora gráfica. Esto significa que, dependiendo de las necesidades del usuario y de acuerdo a sus instrucciones, el programa pueda enviar sus resultados al terminal correspondiente.

^{1/} Este trabajo describe el proyecto especial, desarrollado por el autor como parte de los requerimientos para obtener el grado de Magister en Ciencias, que otorga la Universidad de Londres (referencia 6).

e) Ser en lo posible independiente del paquete gráfico usado. La técnica de programación debió ser tal que, a pesar de que un cierto grado de dependencia fue inevitable, esta debió ser mínima. Esto fue posible de lograr usando sólo aquellas rutinas elementales que por su carácter es probable encontrar en otros paquetes gráficos.

3. Planteamiento del problema y definiciones

Para plantear las ecuaciones que definen el problema fue necesario utilizar definiciones, notación y lo que es más importante algunos supuestos de modelación importantes. Estos tres elementos fueron adoptados a partir de lo que puede llamarse el estado del arte en la materia.

Asumiendo que hay n movimientos, se tendrá para el j ésmo:

q_j = tasa promedio del flujo
 s_j = flujo de saturación
 $y_j = q_j/s_j$ = factor de carga
 λ_j = proporción del ciclo que es verde efectivo
 p_j = máximo grado de saturación aceptable
 d_j = demora media estimada

donde ($j = 1, 2, \dots, n$)

Asimismo si hay m fases durante el ciclo, sea:

λ_i = proporción del tiempo de ciclo que es verde efectivo para la fase i
 L_i = tiempo perdido después de la fase i
 $L = \sum_{i=1}^m L_i$ tiempo perdido total por ciclo
 $a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el movimiento } j \text{ tiene derecho a vía en la fase } i \\ 0 & \text{si no lo tiene} \end{cases}$
 $A = (a_{ij})$ matriz de fase (será de $m \times n$)
 $a_{0j} = \text{proporción del tiempo perdido total (}L\text{) que es verde efectivo para el movimiento } j$
 $\gamma_{im} = \text{tiempo de verde mínimo para la fase } i$
 $C = \text{tiempo de ciclo}$
 $C_0 = \text{tiempo de ciclo máximo o especificado}$
 $\lambda_0 = L/C = \text{proporción del tiempo de ciclo que es tiempo perdido}$
 $\underline{\lambda} = (\lambda_0, \lambda_1, \dots)$

donde ($i = 1, 2, \dots, m$) y ($j = 1, 2, \dots, n$)

Usando esta notación se demuestra que la proporción del ciclo que constituye el verde efectivo para un movimiento j , esta dada por:

$$A_j = \sum_{i=0}^m a_{ij} \lambda_i$$

Dado los flujos, el diseño de fases, los tiempos de verde mínimos, los tiempos perdidos después de cada fase, los flujos de saturación, el máximo grado de saturación aceptable por movimiento y el tiempo de ciclo, ya sea este máximo o especificado, existen dos caminos alternativos para calcular la programación de un semáforo aislado.

El primero es calcular las componentes del sector λ , de tal forma que sean aquellas que maximicen la capacidad de la intersección. Esto es lo que formalmente se denomina como el problema de maximización de la capacidad, o más propiamente la solución de él.

El segundo será calcular las componentes del sector λ , de manera de minimizar la demora experimentada por los vehículos demandantes de la intersección. Estos tiempos, representados por las componentes de λ , son la solución del problema de minimización de la demora; para que este problema tenga solución será necesario disponer de capacidad de reserva en la intersección.

Cualquiera sea el objetivo adoptado la solución óptima estará acotada por una serie de restricciones provenientes de las características del flujo, de la intersección y de algunos valores exógenos (por ej.: entreverde), comúnmente introducidos por el ingeniero de tráfico.

La restricción proveniente de los requerimientos de verde mínima puede escribirse como:

$$\lambda_i \geq k_i \quad (1)$$

donde $k_i = q_{im}/L$

La restricción proveniente del tiempo de ciclo será:

$$\lambda_0 \geq k_0 \quad (2)$$

$$\text{o } \lambda_0 = k_0 \quad (3)$$

donde $k_0 = L/C_0$

Además todas las partes del ciclo deben sumar el total de éste

$$\sum_{i=0}^m \lambda_i = 1 \quad (4)$$

Suponga que se multiplican las tasas de llegadas de todos los movimientos por un factor μ . Se tendrá que las demoras y las colas en todos los movimientos serán aceptables si se cumple la condición (5).

$$\lambda_j \geq \mu q_j / p_j s_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$\sum_{i=0}^m (a_{ij} \lambda_i) - \mu q_j / p_j s_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

El mayor multiplicador de las tasas q_j , que pueda ser acomodado sin incurrir en excesivas demoras o colas se encuentra maximizando μ con respecto a las restricciones antes descritas. En este proceso los tiempos, esto es las componentes de λ , podrán variar, sujetas a las restricciones relevantes, hasta encontrar el máximo μ posible. Llamando μ^* al valor de μ obtenido, entonces si q_j son las tasas de llegada del flujo, el producto $\mu^* q_j$ corresponde a lo que Webster y Cobbe (5) definieron como la capacidad práctica de una intersección.

Se tendrá entonces:

- Si $\mu^* > 1$ se puede definir $100(\mu^*-1)$ que será la capacidad de reserva como porcentaje de la tasa de llegada y $100(\mu^*-1)/\mu^*$ será la capacidad de reserva como porcentaje de la capacidad práctica;
- Si $\mu^* > 1$, $100(1-\mu^*)$ será el grado de sobrecarga como porcentaje de la tasa de llegada y $100(1-\mu^*)/\mu^*$ el grado de sobrecarga como porcentaje de la capacidad práctica.

El cálculo de μ^* es un problema de programación lineal, y formalmente puede ser planteado como:

MAX { μ }

sujeto a:

$$\sum_{i=0}^m (a_{ij} \lambda_i) - \mu q_j / p_j s_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$\lambda_i - k_i \lambda_0 \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

$$\lambda_0 \geq k_0 \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^m \lambda_i = 1 \quad (4)$$

Tratándose de minimizar la demora, es necesario adoptar una expresión para ésta. Webster (4) mostró que la demora media por vehículo para un movimiento j puede ser estimada usando la siguiente ecuación:

$$d_j = \frac{C(1 - \lambda_j)^2}{2(1 - \lambda_j x_j)} + \frac{x_j^2}{2q_j(1 - x_j)} - 0.65 \left(\frac{C}{q_j^2} \right)^{1/3} x_j^{(2+5\lambda_j)} \quad (7)$$

donde $x_j = q_j/\lambda_j s_j$

La demora estimada por unidad de tiempo que experimentan todos los vehículos de los distintos movimientos se calcula mediante la ecuación (8)

$$D = \sum_{j=1}^m q_j d_j \quad (8)$$

Siguiendo a Allsop (1) se tiene que la ecuación (8) se puede expresar como:

$$D(\lambda) = \sum_{j=1}^m \left\{ \frac{1}{\lambda_0} f(\lambda_j) + g_j(\lambda_j) + \left(\frac{1}{\lambda_0} \right)^{1/3} h_j(\lambda_j) \right\} \quad (9)$$

con $f_j(\lambda_j) = \frac{L q_j s_j (1 - \lambda_j)^2}{2(s_j - q_j)} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$

$$g_j(\lambda_j) = \frac{q_j^2}{2s_j \lambda_j (\lambda_j s_j - q_j)} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

$$h_j(\lambda_j) = -0.65 \left(\frac{L}{q_j^2} \right)^{1/3} \left(\frac{q_j}{\lambda_j s_j} \right)^{(2+5\lambda_j)} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

Una aproximación de $D(\lambda)$ será:

$$\frac{9}{10} \sum_{j=1}^m \left\{ \frac{1}{\lambda_0} f_j(\lambda_j) + g_j(\lambda_j) \right\}$$

Allsop (2) demostró que si la demora en una intersección controlada por un semáforo de tiempo fijo, se estima mediante la expresión aproximada de la ecuación (9), entonces, el cálculo de los tiempos del controlador puede planearse como un problema de optimización matemática que tiene solución y ésta es única.

Las restricciones vienen, al igual que para el caso de maximizar la capacidad de los requerimientos de verde mínimo (condición 1), los requerimientos de capacidad de los movimientos (condiciones 6 con $\mu = 1$), los requerimientos de tiempo de ciclo (condición 2) y finalmente la proveniente de la definición de componentes del vector λ (ecuación 4).

Por lo tanto el problema es:

Minimizar $D(\lambda)$

Sujeto a:

$$\lambda_i - k_i \lambda_0 \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

$$\sum_{i=0}^m (a_{ij} \lambda_i) - q_j / p_j s_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$\lambda_0 \geq k_0 \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^m \lambda_i = 1 \quad (4)$$

4. Interpretación geométrica

Cuando el ciclo tiene sólo dos fases, el vector λ tiene tres componentes ($\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$). Cada vector puede considerarse como el vector de las coordenadas de un punto en un espacio de tres dimensiones con respecto a un sistema cartesiano de ejes.

La restricción de mínimo tiempo de verde para la fase 1, define una región de espacio limitada por un plano que atraviesa el eje λ_2 con una orientación dada por k_1 y abierto en la dirección creciente del eje λ_1 .

Asimismo, la restricción de mínimo tiempo de verde para la fase 2, define otra región del espacio limitada por un plano que corta el eje λ_1 con orientación dada por k_2 y abierto en la dirección creciente del eje λ_2 .

Cada una de las restricciones de capacidad, define otra región en el espacio de manera similar a las restricciones de verde mínimo.

La restricción de tiempo de ciclo, también define una región en el espacio limitada por un plano, esta vez paralelo al plano λ_1, λ_2 y abierto en la dirección creciente del eje λ_0 .

Finalmente, la restricción proveniente de la definición de componentes del vector λ es la ecuación de un plano. El plano intersecta la región donde las tres coordenadas son positivas y forma un triángulo equilátero con vértices $(1,0,0)$, $(0,1,0)$, $(0,0,1)$.

Cualquier punto cuyo vector de coordenadas represente tiempos para un controlador deberá estar contenido en el plano antes especificado y además tener todas sus coordenadas positivas. También deberá pertenecer a la región definida por cada una de las otras restricciones.

5. Construcción geométrica

A partir de las relaciones descritas en la sección 3 de este trabajo, se deducen las siguientes ecuaciones válidas para el caso de dos fases.

$$\lambda_1 - k_1 \lambda_0 \geq 0 \quad (10)$$

$$\lambda_2 - k_2 \lambda_0 \geq 0 \quad (11)$$

$$\lambda_0 \geq k_0 \quad (12)$$

$$\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 = 1 \quad (13)$$

$$a_{0j}\lambda_0 + a_{1j}\lambda_1 + a_{2j}\lambda_2 \geq b_j \quad (14)$$

donde:

$$k_1 = g_1 m / L$$

$$k_2 = g_2 m / L$$

$$k_0 = L / C_0$$

$$b_j = q_j / p_j s_j$$

La ecuación (13) define un plano que pasa por los puntos $(0,1,0)$, $(0,0,1)$ y $(1,0,0)$. Todos los puntos factibles deben estar contenidos en este plano. Consecuentemente se estimó que ya no era necesario trabajar en un sistema coordenado de 3 dimensiones, sino en uno solamente con dos ejes solidario al plano mencionado (ver figura 1).

La tasa de demora para la intersección:

$$D(\lambda) = \sum_{j=1}^m \left\{ \frac{1}{\lambda_0} f(\lambda_j) + g_j(\lambda_j) + \left(\frac{1}{\lambda_0} \right)^{1/3} h_j(\lambda_j) \right\} \quad (9)$$

donde $f_j(\lambda_j)$, $g_j(\lambda_j)$ y $h_j(\lambda_j)$ ya fueron definidas y

$$\lambda_j = a_{0j}\lambda_0 + a_{1j}\lambda_1 + a_{2j}\lambda_2$$

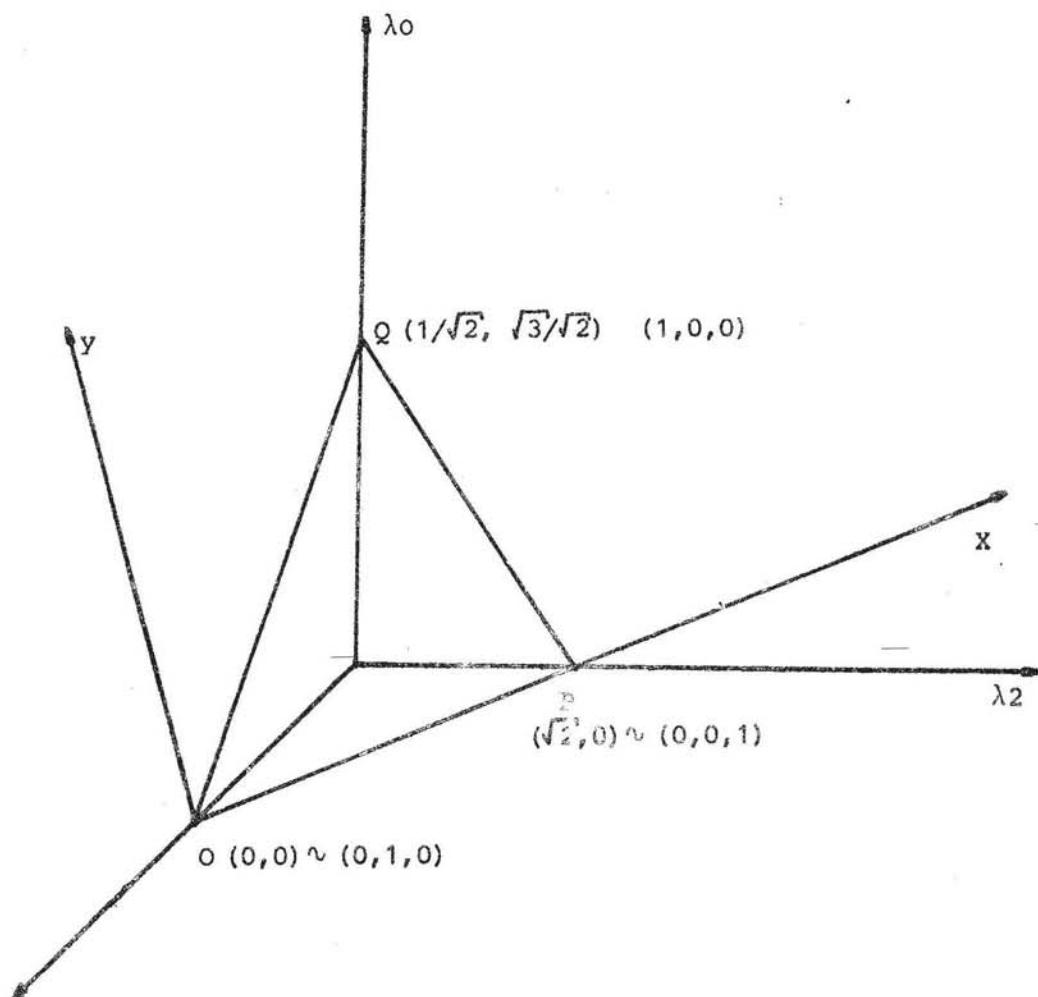


Figura 1

Todas las ecuaciones fueron expresadas en términos del nuevo sistema coordenado, para lo cual se transformaron de acuerdo a la siguiente regla de equivalencia:

$$(\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2) \sim (x^*, y^*)$$

donde:

$$\lambda_0 = y^* \sqrt{2/3} \quad (15)$$

$$\lambda_1 = -(\sqrt{3}x^* + y^*)/\sqrt{6} \quad (16)$$

$$\lambda_2 = (\sqrt{3}x^* - y^*)/\sqrt{6} \quad (17)$$

De acuerdo con estas ecuaciones de transformación se obtuvieron relaciones del tipo $y = f(x)$ para todas las expresiones, esto es la (10) (11), (12), (13), (14) y (9).

En términos generales era necesario dibujar:

- a) Todas las líneas definidas por las ecuaciones que representan las restricciones, incluyendo el triángulo que define la restricción de las componentes del vector λ .
- b) La región factible separadamente, a una escala adecuada y con un reticulado de referencia ad-hoc.
- c) Los puntos de máxima capacidad y mínima demora.
- d) Las curvas de iso-demora.

De acuerdo a la naturaleza de los elementos a dibujar, se consideró que dos diagramas eran suficientes para presentar claramente el problema.

Las componentes del primer diagrama son las líneas de (a). También una indicación para identificar el origen de cada línea. Una escala vertical indicando el tiempo de ciclo, y el significado de la dirección creciente del eje horizontal en función de λ . Finalmente un título que aparece a los pies del diagrama, identifica la intersección y el cálculo en particular.

El método adoptado para dibujar líneas fue el de especificar dos puntos pertenecientes a la línea, es decir las coordenadas de los puntos inicial y final, para unirlos con una línea. Para mayores detalles el lector es referido a Saavedra (6).

Las componentes del segundo diagrama son: la región factible, un reticulado adecuado y concordante con los límites de la región factible; los puntos de máxima capacidad y mínima demora; y las curvas, es decir, aquellos conjuntos de puntos que representan igual demora dentro de la región factible unidos.

El diagrama incluye una leyenda que identifica los principales elementos del diagrama. Los puntos (máxima capacidad y mínima demora) con sus valores, y también los valores para los cuales curvas iso-demora fueron dibujados.

El reticulado se compone de tres elementos: un conjunto de líneas horizontales a diferente altura, que representan los distintos tiempos de ciclo; un conjunto de líneas inclinadas a 60° , que representan la proporción del tiempo de ciclo que es verde efectivo para la fase 2, esto es λ_2 ; un conjunto de líneas inclinadas a 120° , que representan la proporción del tiempo de ciclo que es verde efectivo para la fase 1, esto es λ_1 .

Las líneas horizontales del reticulado que representan el tiempo de ciclo, son dibujadas para valores de éste 24, 12, 6, 3, 2, 1.5 y 1 veces el tiempo perdido total (L). Algunos valores intermedios son indicados como referencia. Estos son para tiempos de ciclo 8, 5, 4 y 2.5 veces el tiempo perdido total (L).

Las líneas inclinadas del reticulado, asociadas a λ_1 y λ_2 , son dibujadas cada décima de la unidad.

Para dibujar solamente aquella parte del reticulado relevante de acuerdo a las dimensiones y posición de la región factible se siguió el siguiente método:

a) Conocidas las coordenadas de los vértices de la región factible en el sistema (X , Y) y transformando éstas al sistema (λ_0 , λ_1 , λ_2) mediante las ecuaciones (15), (16) y (17), se determinan los máximos y mínimos valores para λ_1 , λ_2 y λ_3 .

b) Se identifica la línea del reticulado más próxima por abajo en el caso de mínimos y por arriba para los máximos.

El problema de identificar la región factible fue abordado a partir de las siguientes consideraciones:

a) La región factible es un polígono cerrado, definido por algunas de las ecuaciones provenientes de las condiciones impuestas.

b) La solución se remite a encontrar cuales de estas líneas constituyen límites de la región, y las coordenadas de los vértices.

c) Se conocen las ecuaciones de las líneas y también un punto dentro de la región, este es el punto de máxima capacidad calculado de acuerdo a Allsop (3).

En base a estos antecedentes se desarrolló un algoritmo apropiado al caso, el cual está descrito en extenso en la referencia (6).

Los puntos de máxima capacidad y mínima demora son calculados de acuerdo a las referencias (3) y (2) respectivamente. El problema de identificar y dibujar las curvas de iso-demora fue abordado como se describe a continuación.

Primero se decidió dibujar 7 curvas en todos los casos, considerando que este número sería suficiente para proporcionar una buena visión de la función de demora, pero no demasiado para hacer confuso el diagrama.

A continuación se estableció un criterio para determinar los 7 valores de demora que serían dibujados. Este fue el de poner las curvas parejamente distribuidas en la dirección determinada por la unión del punto de mínima demora con el punto de máxima demora dentro de la región factible. Este criterio da la ventaja de un diagrama bien distribuido, en la mayoría de los casos, conjuntamente con un amplio rango de curvas.

Para implementar este criterio se desarrolló un algoritmo, explicado en la referencia (6). Una vez definido el número y valores de las curvas, corresponde describir como fueron éstas dibujadas.

Los puntos pertenecientes a una curva dada se localizan definiendo un radio con centro en el punto de mínima demora y rotándolo en sentido contrario a los punteros del reloj. Los ángulos inicial y final son definidos de acuerdo a si el punto de mínima demora pertenece a uno a más ejes-frontera de la región factible o no.

En el primer caso los valores dependerán de varios factores y dado el alcance de este documento no serán aquí incluidos (ver referencia 6), y en el segundo estos serán 0 y 2π respectivamente.

Suponga que un conjunto de puntos, que tengan el mismo valor de demora asociado (con una cierta precisión), son identificados al término de una búsqueda circular para una curva en particular.

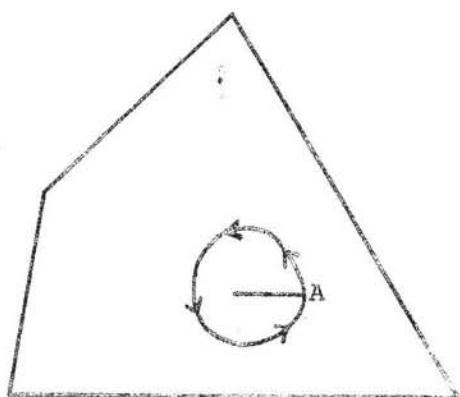
El dibujar la curva consiste en unir puntos sucesivos con una sucesión de interpolaciones cúbicas para obtener una gráfica de gradiente continuo.

La Figura 2 ilustra el procedimiento, A representa el punto donde comienzan ambos procesos, la búsqueda circular y la acción de dibujar. También A es donde ambos terminan.

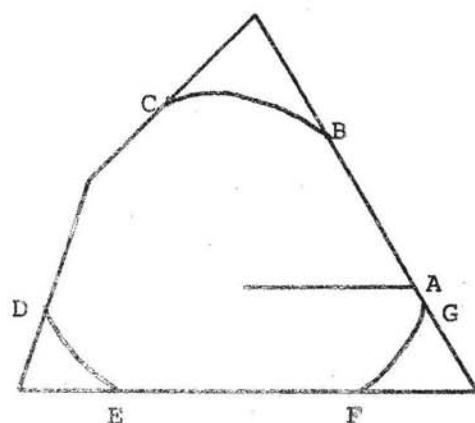
Las curvas podrán ser dibujadas en segmentos, en caso de ser necesario.

Esto sucede cuando durante el proceso de búsqueda circular para un radio dado, el valor de la demora buscada no existe dentro de los límites de la región factible. Entonces la curva será dibujada hasta este último punto encontrado (para efectos del dibujo este punto se define como la intersección del radio con la frontera de la región factible, para la primera oportunidad en que el punto no es encontrado), partiendo desde primer punto encontrado dentro de la región factible siempre que no haya sido unido a la curva aún (nuevamente para efectos del dibujo este punto se define como la intersección del radio con la frontera de la región factible la última oportunidad que el punto no fue encontrado).

La Figura 3 ilustra el procedimiento, donde A representa el punto de inicio y término del proceso de búsqueda circular, B es el punto donde el primer segmento de curva se comienza a dibujar y C donde se termina. D, E, F y G corresponden a B y C para el segundo y tercer segmento respectivamente.



Curva completa
Figura 2



Curva en segmentos
Figura 3

Se desarrolló un algoritmo para incorporar al programa el método ya explicado para dibujar las curvas iso-demora. Al igual que para los algoritmos anteriores al lector es referido a (6) para mayores antecedentes.

6. El programa computacional

El programa está escrito en FORTRAN IV y dibuja los dos diagramas descritos en la sección anterior. Para esto usa información suministrada en forma interactiva. Los datos son verificados a medida que son leídos. De modo que no contengan errores cuando otras secciones del programa se ejecuten.

Un listado de los datos de entrada, de acuerdo a un formato comúnmente usado, es producido durante el proceso.

El programa puede entregar los resultados en un terminal de pantalla gráfica, o bien en una impresora gráfica. En el primer caso el programa espera, después de haber producido el primer diagrama, para proceder con el segundo. En el segundo la impresora gráfica es llamada sólo una vez a dibujar los dos diagramas, de manera que ambos son producidos en una página.

El programa fue desarrollado en base a los programas SIGCAP y SIGSET (7). Los nombres de las variables y también dos subrutinas, una del SIGCAP y otra del SIGSET, fueron tomadas de los mencionados programas. Las subrutas gráficas están basadas en el software gráfico GINO-F (8).

El programa está construido a partir de un programa principal más 26 subrutinas y 2 funciones. En conjunto suman alrededor de 2000 records, incluyendo 130 de comentarios. La Figura 4 ilustra la estructura del programa.

El programa se ejecuta en la siguiente secuencia:

- a) Lee y verifica los datos

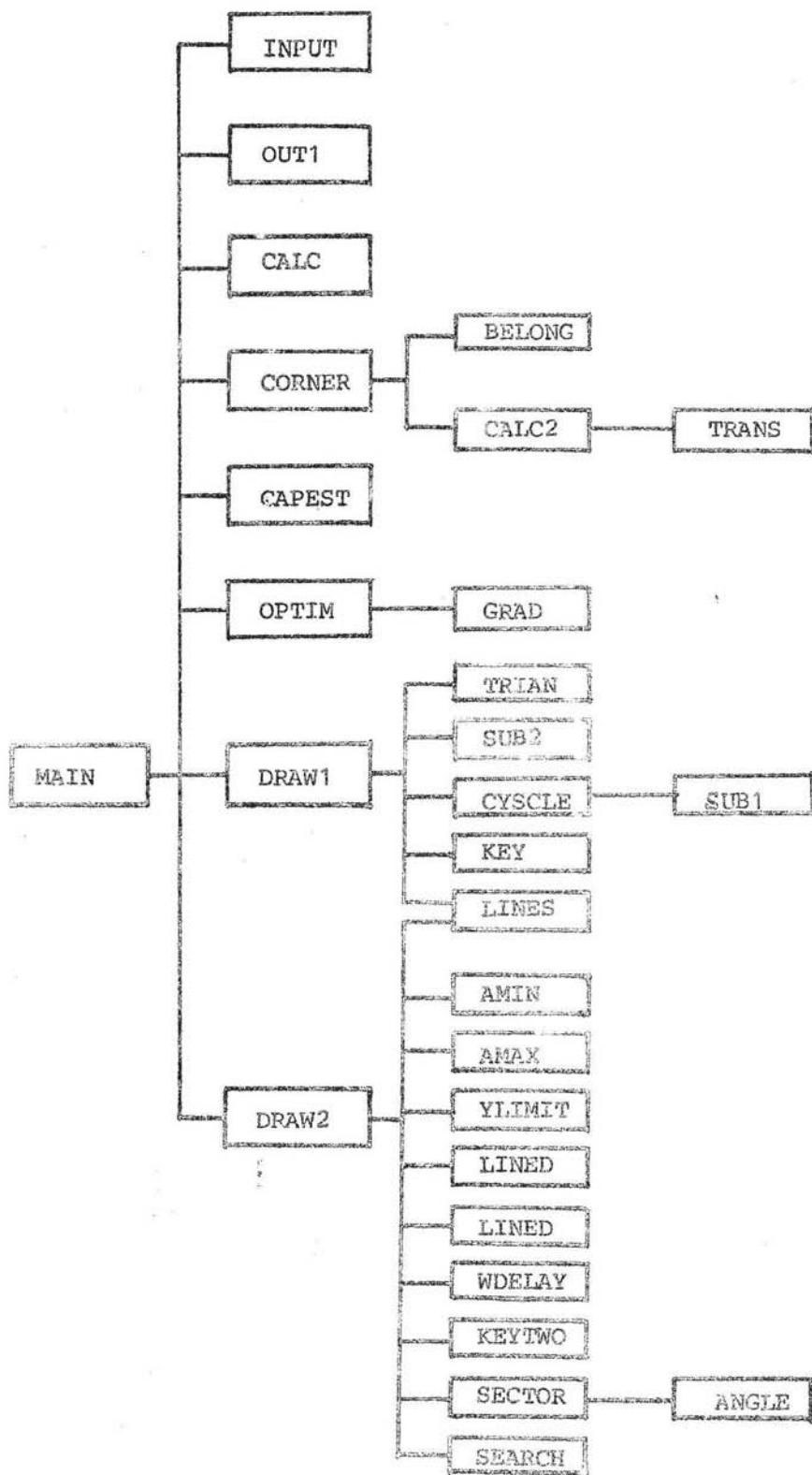


Figura 4

- b) Imprime los datos
- c) Selecciona la unidad de salida, de acuerdo a lo especificado en los datos
- d) Dibuja el primer diagrama, y verifica si dado el patrón de flujos especificado se encuentra dentro de la capacidad práctica de la intersección con los datos proporcionados.
- e) De ser así, calcula los tiempos que minimizan la demora total para intersección, y dibuja el segundo diagrama.

7. Limitaciones y trabajo a futuro

Hay dos tipos de limitaciones. Las primeras provienen del sistema donde fue desarrollado y ejecutado el programa y las otras del programa en sí mismo.

En el primer grupo la más relevante es consecuencia de haber usado las subrutinas gráficas del paquete GINO-F¹⁷.

En el segundo grupo hay una variedad de limitaciones algunas inherentes al proyecto tal como fue concebido y otras que surgieron en el camino.

Dentro de las inherentes al proyecto, la más importante limitación es sin duda que sólo se pueden procesar intersecciones de dos fases, únicamente para las cuales los diagramas toman la forma construida por el programa. No obstante, la subrutina de entrada de datos fue diseñada para aceptar los datos de intersecciones de tres fases. Esto permite pensar en incorporar una subrutina alternativa para dibujar los diagramas correspondientes.

Dentro de las limitaciones que surgieron al desarrollar el programa la más relevante es el caso que un movimiento tenga en total una cantidad de verde adicional igual a la mitad del tiempo total perdido (L), con lo que $aoj=0.5$ originándose problemas en la definición gráfica de la restricción correspondiente (capacidad) para el movimiento.

A parte de ésta el resto son limitaciones teóricas, es decir, casos que no corresponden a la realidad.

Finalmente como posibles líneas de trabajo a futuro se tiene:

- a) Implementar el programa, en su estado actual, en un sistema disponible en el país.

¹⁷ Actualmente se trabaja para adaptar el programa de acuerdo al Software gráfico disponible en el país. Se estima que en un plazo cercano a 2 meses se dispondrá del programa ejecutable.

b) Incorporar algunas mejoras al programa, por ej.: el caso cuando el tiempo de ciclo es especificado y no sujeto a un máximo (actualmente en este caso no se genera el segundo diagrama, sería interesante generar un segundo diagrama apropiado).

c) Incorporar al programa la situación base, es decir, que el programa identifique y grafique la programación existente en el controlador.

d) Desarrollar un programa similar que maneje el caso de intersecciones de tres fases, este programa con el aquí descrito podrían integrar un solo paquete computacional.

Sin duda las tareas son de diferente magnitud, siendo esta última la que requerirá de mayor dedicación y mayor cantidad de recursos.

Referencias:

1. Allsop, R.E. (1971). A diagram showing practicable settings for a fixed-time signal and their effect on delay. *Transportation Research*, 5, 59-65.
2. Allsop, R.E. (1971). Delay-minimising settings for fixed-time traffic signals at a single road junction. *Journal of the Institute of Mathematics and its Applications*, 7.
3. Allsop, R.E. (1972). Estimating the traffic capacity of a signalized road junction. *Transportation Research*, 6, 245-255.
4. Webster, F.V. (1958). Traffic signal settings. *Road Research Technical Paper N°39*. London; HMSO.
5. Webster, F.V. and Cobbe, B.M. (1966). Traffic signals *Road Research Technical Paper N°56*. London, HMSO.
6. Saavedra, J.A. (1983). Graphical representation of effect of signal timings on delay at 2-stage junctions using computer graphics. *MSc Special Study Report, Imperial College and University College London*.
7. Allsop, R.E. (1981). Computer program SIGSET for calculating delay-minimising traffic signal timmings. Description and manual for users. *Transport Studies Group U.C.L. ISSN 0142-6052*.
8. Computer Aided Design Centre (1976) GINO-F User Manual.