

JUSTIFICACION DE INSTALACION DE SEMAFOROS; UNA REVISION Y
COMPLEMENTACION DE LOS CRITERIOS EXISTENTES DESDE UNA
PERSPECTIVA DE EVALUACION SOCIAL

Héctor Díaz C. - Víctor Allendes V.
SECRETARIA EJECUTIVA DE LA COMISION DE PLANIFICACION
DE INVERSIONES EN INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE
(SECTRA)

Aníbal Pinto 442 4º Piso, Concepción, Chile

RESUMEN

En la actualidad, en Chile la instalación (o retiro) de semáforos está regulada por los criterios contenidos en el Manual de Señalización de Tránsito, publicado por el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. Sin embargo, aún cuando tales criterios entregan una orientación general, subsisten en la práctica situaciones en que ellos son de difícil aplicación.

En efecto, debido al carácter discreto de los criterios que dicen relación con los volúmenes de tráfico involucrados en cada una de las vías en conflicto, resulta común encontrar configuraciones de flujos que no son clasificables dentro de las combinaciones definidas por la norma por que esta exige que se superen ciertos umbrales de flujo "en cada una de las ocho horas de mayor demanda" del día.

El presente trabajo hace una revisión crítica de los estándares vigentes, proponiendo modificaciones y extensiones a ellos desde una perspectiva de evaluación social, comparando costos y beneficios de los usuarios de la intersección en la situación con semáforo y sin él, ya que tal como lo reconoce la norma nacional, es en esta comparación (sujeta por cierto a restricciones de seguridad) en que se funda la necesidad de instalación de un semáforo.

Para efectos de comparación se simuló la operación de una intersección típica mediante el uso de dos modelos: PICADY 2 para el caso en que la intersección opera con señal de prioridad y SIDRA en el caso de operación con semáforo.

En esta etapa de la investigación, se tiene resultados para una intersección en cruz, con cuatro combinaciones posibles de número de pistas en los accesos y para dos composiciones de tráfico: con y sin presencia de locomoción colectiva. No se ha considerado aún el efecto de los camiones.

Finalmente, se entrega una proposición preliminar de una metodología para justificación de semaforización, incluyendo ábacos para facilitar la evaluación de costos y beneficios.

1. INTRODUCCION

La Norma de justificación de semáforos (actualmente vigente) contiene exigencias que apuntan básicamente a tres aspectos fundamentales: disminución de las demoras totales en la intersección (volumen vehicular mínimo); disminución de demoras excesivas en la vía no prioritaria (Interrupción de la continuidad de flujo) y disminución de accidentes. La justificación de semáforos peatonales no se considera en el presente trabajo.

Para controlar los dos primeros aspectos la norma establece flujos mínimos en tanto que para el tercero exige que el riesgo de accidente sea manifiesto y recomienda analizar la estadística de accidentes en la intersección estipulando un mínimo de 5 ocurrencias en los últimos tres años.

Aún cuando la norma entrega una orientación general, subsisten en la práctica situaciones en que ella es de difícil aplicación por cuanto exige que los flujos que acceden a la intersección sean iguales o superiores a ciertos umbrales mínimos.

En la práctica suele ocurrir que los flujos superan holgadamente tales umbrales en algunos períodos (horas punta) pero no los alcanzan en el resto del día. Otra situación común es que el flujo en una de las vías exceda con largueza el mínimo requerido en tanto que el flujo por la otra vía no alcanza a cumplir con el valor estipulado por la norma. Cuando alguna de estas situaciones se presenta, no es posible establecer con certeza la pertinencia o no de instalar o retirar un semáforo.

En este caso, las frecuentemente poderosas presiones de la comunidad y a veces la apreciación subjetiva del problema de la autoridad encargada de la administración del sistema, imponen la instalación de semáforos allí donde un análisis más refinado del problema lo habría mostrado inconveniente. Se trata de un típico problema de evaluación en que la respuesta a la pregunta de ¿qué es más conveniente? debe obtenerse mediante la aplicación del criterio de maximización del beneficio social.

A pesar de su evidente utilidad, este análisis más detallado no siempre es posible, ya sea por falta de recursos técnicos o económicos en los Municipios encargados del problema. De esta manera, una solución práctica puede provenir de una redefinición de la norma, que permita cuantificar razonablemente los beneficios o costos de instalación de un semáforo una manera relativamente rápida y sencilla.

Por otra parte, debido a que no es posible inferir con certeza a partir de los niveles de flujo (ni siquiera conociendo información geométrica y operacional de la intersección) la frecuencia de ocurrencia de accidentes, este aspecto no será abordado en este trabajo, concentrándose el estudio sólo en la justificación por la vía de minimización de los costos de los

usuarios, manteniendo la recomendación de que el criterio de disminución de accidentes debe ser analizado para cada caso en particular.

Es así como en el presente trabajo se comparan los costos sociales en el caso de una intersección operando con señal de prioridad versus su operación semaforizada. Esta comparación, en esta etapa de la investigación se ha realizado solamente a través de modelación, quedando para una etapa posterior la toma de datos en terreno que permitan complementarlos adecuadamente.

Finalmente, se entrega una proposición preliminar de una metodología para justificación de semaforización, incluyendo ábacos para facilitar la evaluación de costos o beneficios.

Incluyendo ésta introducción el trabajo consta de seis puntos.

En el segundo se entrega el análisis de la actual norma. En el tercer punto se muestra la metodología usada para comparar los costos de los usuarios en la situación con y sin semáforo. Una breve descripción de los modelos utilizados se presenta en el punto cuarto. El punto quinto entrega los principales resultados y una comparación entre los costos generados por una intersección prioritaria y una semaforizada.

Finalmente en el punto sexto se adjuntan las principales recomendaciones y conclusiones.

2. ANALISIS DE LA NORMA DE JUSTIFICACION DE SEMAFOROS EN CHILE

La norma chilena establece dos criterios mínimos para instalar o suprimir semáforos. El primero corresponde a las intensidades mínimas del flujo horario y el segundo está dado por las demoras máximas que puede experimentar el flujo de la vía secundaria.

Las figuras 2.1; 2.2 ; 2.3 y 2.4 muestran gráficamente, lo recomendado por la norma, en ellas se puede visualizar:

- a.- Para flujos inferiores a 75 [veh/hr] en la vía secundaria, la norma no recomienda la instalación de semáforos de tiempo fijo, independientemente de la magnitud del flujo en la arteria principal. En el caso de semáforos actuados, este valor disminuye a 56 [veh/hr].
- b.- Si los flujos de la vía principal y secundaria son similares y menores que 500 [veh/hr] por cada arteria, no se justifica la instalación de un semáforo de tiempo fijo, lo cual parece ilógico debido a que por una parte, no se tiene claridad con respecto a cual es la arteria principal y por otra las demoras en el acceso elegido como secundario (al azar) serían elevadas.

- c.- Además, la norma exige que los umbrales se cumplan en cada una de las ocho horas de mayor demanda de un día promedio. Este aspecto resulta particularmente difícil de abordar debido a la variabilidad de los niveles de flujo a lo largo del día. Es así como suele ocurrir que en las horas de máxima demanda los flujos sean mucho mayores que los requeridos, en tanto que en el resto del día estos valores caigan por debajo del umbral mínimo. En estos casos puede ocurrir que la suma de los beneficios de la operación de un semáforo en las horas punta (las cuales pueden ser menos de 8) superen a los desbeneficios de las restantes horas. De ser así la actual norma no justificaría la instalación del semáforo, a pesar que el criterio de maximización del beneficio social lo hace aconsejable.

3. METODOLOGIA DE COMPARACION

Para efectos de comparación se utilizó una intersección en cruz con las mismas combinaciones de pistas que usa la norma chilena. De esta manera se obtuvieron cuatro combinaciones. El estudio no ha considerado en esta etapa el caso de intersecciones en "T".

Como criterio para decidir la conveniencia de instalación de un semáforo se usó la comparación entre los costos de los usuarios en la situación sin semáforo versus la situación con semáforo. Para ello, en adelante se trabajará con la diferencia algebraica entre los costos en la situación sin semáforo y la semaforizada.

Se postuló así la existencia de curvas de ISOBENEFICIOS para las cuales el valor de tal diferencia entre costos es constante.

Debido a que la definición en términos analíticos de la función de costos para una intersección que considere, el sistema de control, su geometría y la magnitud de los flujos es un problema aún no resuelto, para obtener las curvas de ISOBENEFICIOS se prefirió un enfoque de simulación mediante los modelos PICADY 2 y SIDRA, evaluando esta función para diferentes combinaciones de flujos (Q_1, Q_2). Así las curvas de isobeneficios se determinaron a partir de interpolación entre los valores encontrados para los distintos pares.

El número de puntos a evaluar resultó de un equilibrio entre las necesidades de precisión en la definición de las curvas de isobeneficios y la necesidad de mantener el problema dentro de dimensiones manejables, ya que cada par elegido (Q_1, Q_2) debía simularse dos veces (con y sin semáforo) y para cuatro configuraciones geométricas distintas. Es así como se evaluaron los costos para 35 pares de flujos distintos, (lo que representó un total de 140 corridas de cada modelo de simulación). Estos pares se definieron haciendo variar los flujos de la siguiente manera:

Q_2 : entre 0 y 1050 [veh/hr], con un paso de 150 [veh/hr]
 Q_1 : entre Q_2 y 1050 [veh/hr], con el mismo paso.

Una vez simulada la operación de cada configuración geométrica, para cada par de flujos, se calcularon los costos de los usuarios en la situación con y sin semáforos.

Para el efecto se calcularon los costos sociales como la suma de los costos de tiempo de los usuarios más los costos por consumo de combustibles por demoras y detenciones. Empleando la metodología contenida en el documento de referencia 1.

Aquí surgió un nuevo aspecto que debía considerarse: los costos de tiempo y combustible son función de la composición del tráfico. Este aspecto es de difícil solución si se quiere contar con resultados que puedan tener alguna generalidad. En rigor debe evaluarse para distintas composiciones del flujo, pero ello hace del todo inmanejable el problema. Por esta razón, dependiendo de la presencia o no de locomoción colectiva, se distinguieron sólo dos situaciones diferentes:

- a. La componente de locomoción colectiva es despreciable o nula en ambos accesos.
- b. Existe locomoción colectiva, y la proporción de ella es idéntica en ambos accesos. Esta proporción es fija e igual a 21% (en vehículos reales) y se obtuvo a partir de la referencia 5.

Los valores de las tasas de ocupación típicas se obtuvieron de la referencia 5 y el vector de precios sociales de recomendaciones de MIDEPLAN (Dic. 1990). De esta manera se usó:

Tasa de Ocupación V.L	=	1.5	[pax/veh]
Tasa de Ocupación L.C	=	15.83	[pax/veh]
Valor del tiempo	=	157.2	[\$/hr]
Valor gasolina	=	88	[\$/lt]
Valor Diesel	=	88.23	[\$/lt]

Con estos datos, se procesaron las salidas de los modelos PICADY 2 y SIDRA calculándose los costos de tiempo y combustible, en las situaciones con y sin semáforo; para las dos composiciones de tráfico, en cada una de las 35 combinaciones de flujo y para las 4 configuraciones geométricas.

Con la diferencia de costos calculada para cada una de las configuraciones así definidas, se procedió a determinar la forma de las curvas de isobeneficios. Para ello previamente se realizó un ajuste polinomial (de grado variable entre 2 y 5) para los valores de $Q_1 = \text{cte.}$ con Q_2 variable, y viceversa. Se eligió un ajuste polinomial debido a que los costos varían en forma no lineal cuando el flujo de una de las vías crece y el otro se mantiene constante. (Es decir la pendiente de la superficie definida por la función de costos es variable, en ambas direcciones)

4. MODELOS COMPUTACIONALES UTILIZADOS

4.1 Intersecciones prioritarias

Para la Modelación de las Intersecciones Prioritarias se utilizó el paquete computacional PICADY 2 (referencia 2).

Una variable de importancia, que no es entregada directamente por PICADY 2 es el número de detenciones experimentadas en la intersección por los vehículos. Para su determinación se utilizó un modelo de brechas modificado, de manera que:

$$h = 1 - (1 - q_p \hat{Q}) * e^{-(q_p(p - \hat{Q}))} \quad (4.1)$$

donde:

h = Porcentaje de vehículos que se detiene si no existe cola.
 p = Brecha crítica (seg).
 $\hat{Q} = 1/Q_p$.
 Q_p = Capacidad vía principal (veh/seg).
 q_p = Flujo arteria principal (veh/seg).

Si existe cola de "n" vehículos, se tiene:

- i.- El primer vehículo en cola no se afecta por la presencia de la cola, es decir, vale para él, la expresión (4.1).
- ii.- El segundo vehículo experimenta una detención y luego se enfrenta a la intersección experimentando un porcentaje de detenciones dado por h. Luego en total incurre en (1 + h) detenciones.
- iii. El vehículo "n" incurre en un total de (n - 1 + h) detenciones.

Luego el número de detenciones experimentado por un vehículo cualquiera tiene una distribución que varía entre h (para el primer vehículo) y (n - 1 + h) (para el último vehículo en cola).

De ésta manera, se tiene que el promedio de la distribución es:

$$DET = \frac{h + (n - 1 + h)}{2} = \frac{n + 2h - 1}{2} \quad (4.2)$$

El total de detenciones será entonces:

$$DET_{\text{totales}} = \frac{q(n + 2h - 1)}{2} \quad (4.3)$$

Donde:

q = Flujo en (veh/hr)

n = Largo de la cola, en vehículos.

h = Porcentaje de vehículos que se detienen si no existe cola.

4.2 Intersecciones semaforizadas

Para el caso con semáforo, se utilizó SIDRA (referencia 3).

Debe mencionarse aquí que el modelo se utilizó permitiendo que seleccionara el ciclo óptimo imponiendo solamente restricciones de verdes mínimos asociados al tiempo de cruce de peatones acorde con la geometría de la intersección modelada. Dado que se trata de una intersección tipo, el diseño de etapas que se eligió fué el más sencillo: dos etapas, una para dar derecho de paso a cada una de las vías en conflicto.

5. CURVAS DE ISOBENEFICIOS

Una vez modelada la intersección se procedió a calcular los costos respectivos determinando las curvas de isobeneficios. Ellas representan todos los pares de flujos para los cuales el costo de operación sin semáforo menos el costo de operación con semáforos tiene el mismo valor, expresado en \$/hr de operación de la intersección

Los abacos 5.1; 5.3; 5.5 y 5.7 representan las curvas de isobeneficios, para el caso en que la proporción de locomoción colectiva es nula. Por otra parte los abacos 5.2; 5.4; 5.6 y 5.8 se refieren al caso en que existe locomoción colectiva.

Puede verse en estos ábacos, que la pendiente de las superficie de diferencia de costos es variable, por lo que las curvas de isobeneficios se encuentran muy separadas para combinaciones de flujos bajos y muy cercanas entre sí para combinaciones de flujos altos.

Para la utilización práctica de los ábacos se propone que con los datos de flujos vehiculares medidos en terreno y agrupados por hora se determine para cada hora, en el ábaco respectivo el costo (o beneficio) para los usuarios de instalar un semáforo.

Se entiende que existe beneficio por instalación de semáforo cuando el punto de coordenadas (Q_1, Q_2) está sobre la línea de isobeneficio cero, es decir, en las líneas de isobeneficio positivas.

Es así como, la instalación de un semáforo se justificará cuando la sumatoria para todos las horas consideradas del día sea positiva, en caso contrario la intersección debe funcionar mediante una regla de prioridad adecuada (pare o ceda el paso dependiendo de su visibilidad).

Cabe hacer notar que a partir de los resultados obtenidos de los ábacos es posible evaluar la rentabilidad social de instalar un semáforo. En efecto, si se tienen los beneficios por hora, es posible extrapolarlos al año multiplicándolos por el número de veces que esa hora "tipo" se repite en la semana y por el número de semanas al año.

Una restricción posible a la aplicación del criterio anterior está dada por demoras excesivas en la arteria secundaria. Para controlar este aspecto, se propone en este trabajo limitar dicha demora a 60 segundos. La línea punteada mostrada en los abacos representa esta curva. Así se sugiere, que es conveniente la semaforización para configuraciones de flujos que caen sobre esta curva.

6. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y LIMITACIONES

- 6.1 Se ha desarrollado un trabajo que muestra la necesidad de redefinir en un breve plazo la norma actualmente existente, ya que como se vé existen pares de flujos para los cuales la instalación de un semáforo arroja beneficios y que la norma actual no permite semaforizar. También existen casos en que ocurre lo inverso.
- 6.2 La metodología aquí propuesta para justificar la instalación de semáforos es mejor que la contenida en la norma en vigencia actualmente, puesto que considera como función objetivo la maximización del beneficio social de los usuarios. Por otra parte, considera el problema de la variación temporal de los niveles de flujos en la intersección, aspecto que la actual norma ignora. Por último presenta ventajas al permitir, para cualquier par de flujos determinar el costo (o beneficio) asociado a la semaforización.
- 6.3 En el estado actual de este trabajo, se ha fijado de manera arbitraria el límite de 60 seg como promedio de la demora máxima que los conductores están dispuestos a esperar en la vía secundaria. Por sobre este límite se asume que los conductores podrían intentar cruzar la intersección aún a costa de disminuir su seguridad. Claramente es necesario iniciar investigaciones que permitan determinar en forma más rigurosa cual es el valor de esta demora máxima que el promedio de los usuarios acepta. De esta manera debe entenderse la proposición de 60 segundos sólo a manera referencial. Debe notarse sí, que dada una demora máxima cualquiera, la metodología aquí propuesta permite dibujar la curva correspondiente.
- 6.4 Esta metodología no considera la existencia de semáforos aguas arriba de la intersección en estudio. De existir esta situación no son válidas la hipótesis de llegadas aleatorias que subyacen en el modelo SIDRA. Por supuesto, esta limitación también es compartida por la norma actual.

- 6.5 Un aspecto que será abordado en la etapa siguiente de esta investigación es la necesidad de mejorar los ajustes de las curvas de isobeneficios a través de una densificación de la malla de puntos (Q_1 , Q_2).
- 6.6 Otra forma de mejorar la confiabilidad en la estimación de costos es reemplazar en una etapa posterior el uso del modelo PICADY por la medición de colas, demoras y detenciones en terreno. Por supuesto, esta manera de enfrentar el problema también presenta dificultades, dadas por posibles errores en las mediciones de terreno.
- 6.7 Otra limitación del método es que se han dibujado las curvas de isobeneficios, en función de valores fijos del vector de precios sociales por lo que al cambiar este, ellas dejan de ser válidas. Esta limitación puede levantarse si se dibujan las curvas de modo que ellas representen ahorros de recursos físicos.
- 6.8 Debe notarse que no se han considerado otros costos de operación debido a que estudios recientes (referencias 1 y 6) muestran que ellos dependen esencialmente de la rugosidad del pavimento y de la longitud recorrida, factores que se consideran invariables en el presente trabajo.
- 6.9 Por último, para determinados niveles de flujo, las rotondas constituyen una alternativa a la semaforización, sin embargo ellas no se abordaron en este trabajo, quedando su estudio para una etapa posterior.

REFERENCIAS

1. MANUAL DE DISEÑO Y EVALUACION SOCIAL DE PROYECTOS DE VIALIDAD URBANA. Comisión de Transporte Urbano, Secretaría Ejecutiva, 1988.
2. HERCB/R/31 PICADY. Department of Transport. Highways Computing Division. U.K. 1985
3. TECHNICAL MANUAL ATM Nº 19: SIDRA 2.2, Australian Road Research Board. 1986
4. MANUAL DE SEÑALIZACION DE TRANSITO. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. 1982
5. ESTUDIO DE MEJORAMIENTO GESTION DE TRANSITO RED CENTRO DE CONCEPCION. Sectra.
6. MANUAL DE MODELO DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS RIGIDOS Y FLEXIBLES EN ZONAS URBANAS. Sectra - I.C.R. 1990.

CRITERIO JUSTIFICACION SEMAFOROS (MINUTAJES)

VIA PRINCIPAL 1 PISTA
 VIA SECUNDARIA 2 PISTAS
 CASO CON Y SIN LOCUCION COLECTIVA

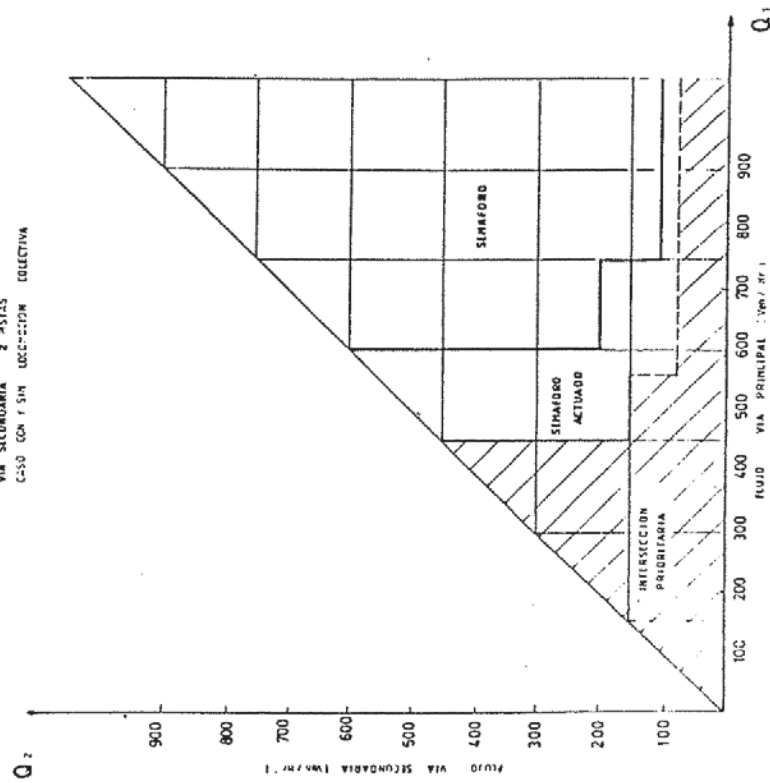


Fig. 2.1

CRITERIO JUSTIFICACION SEMAFOROS (MINUTAJES)

VIA PRINCIPAL 1 PISTA
 VIA SECUNDARIA 1 PISTA
 CASO CON Y SIN LOCUCION COLECTIVA

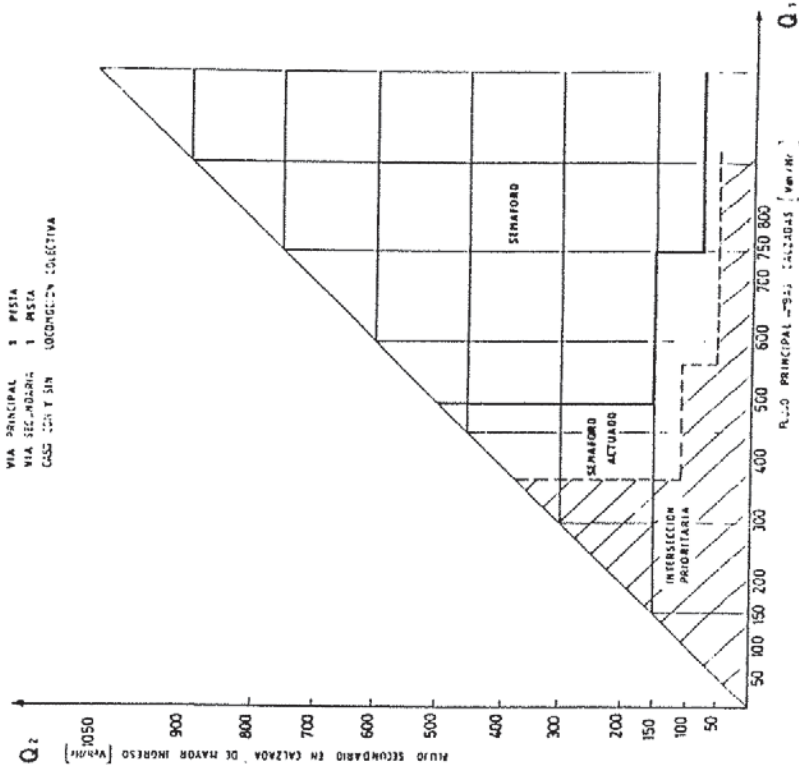


Fig. 2.2

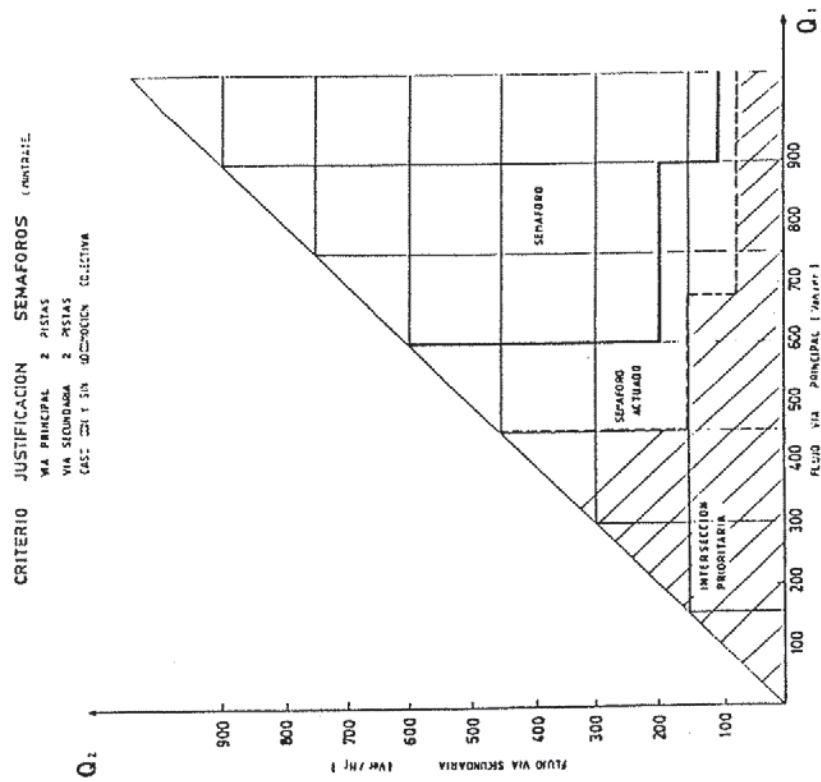


Fig. 2.4

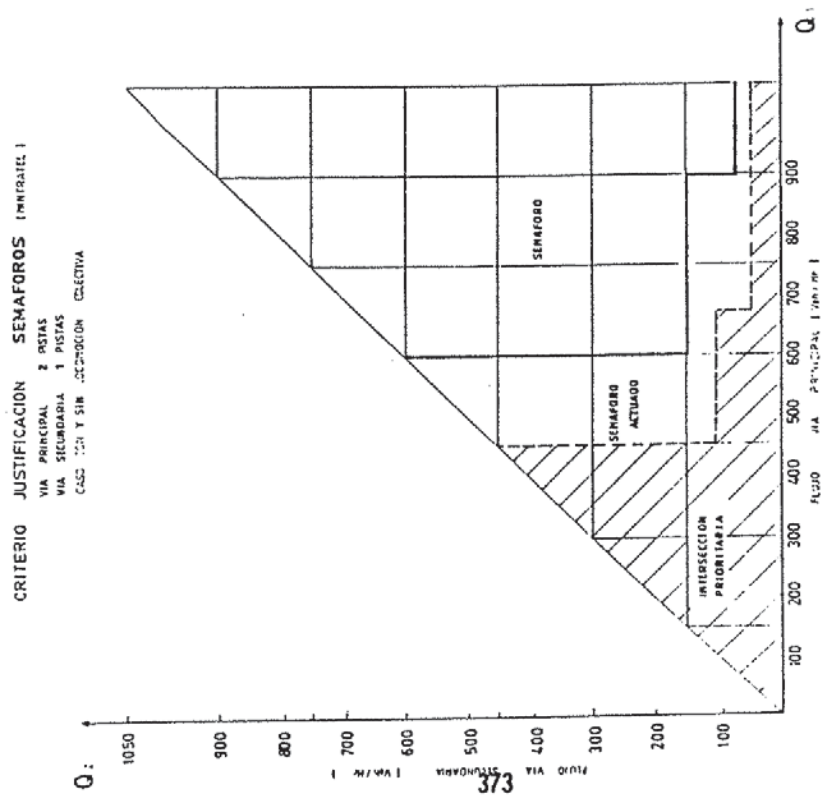


Fig. 2.3

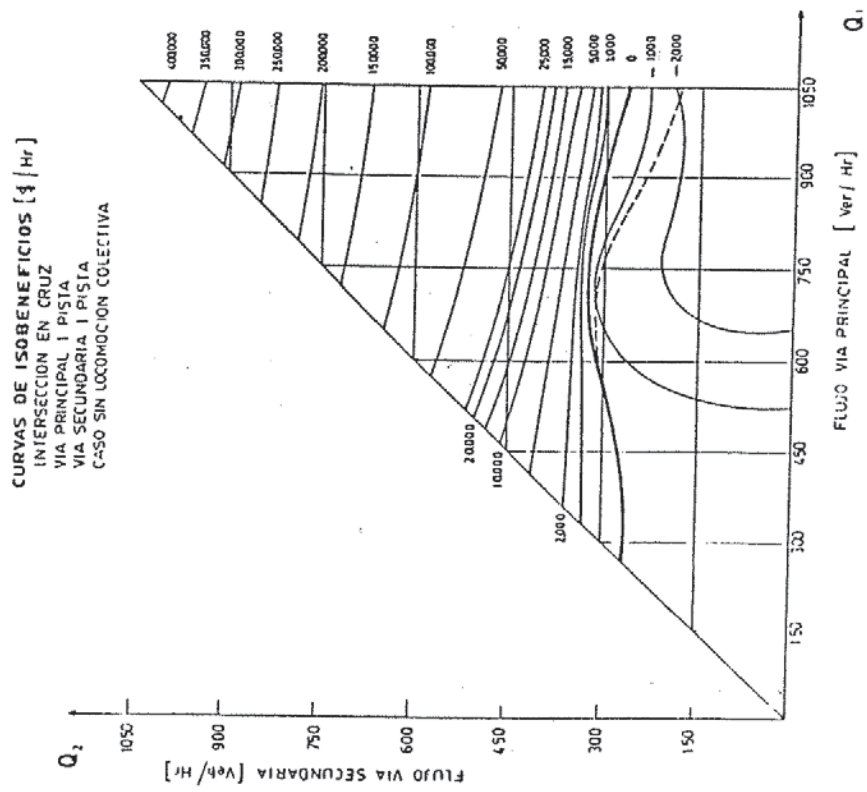


Fig. 5.1

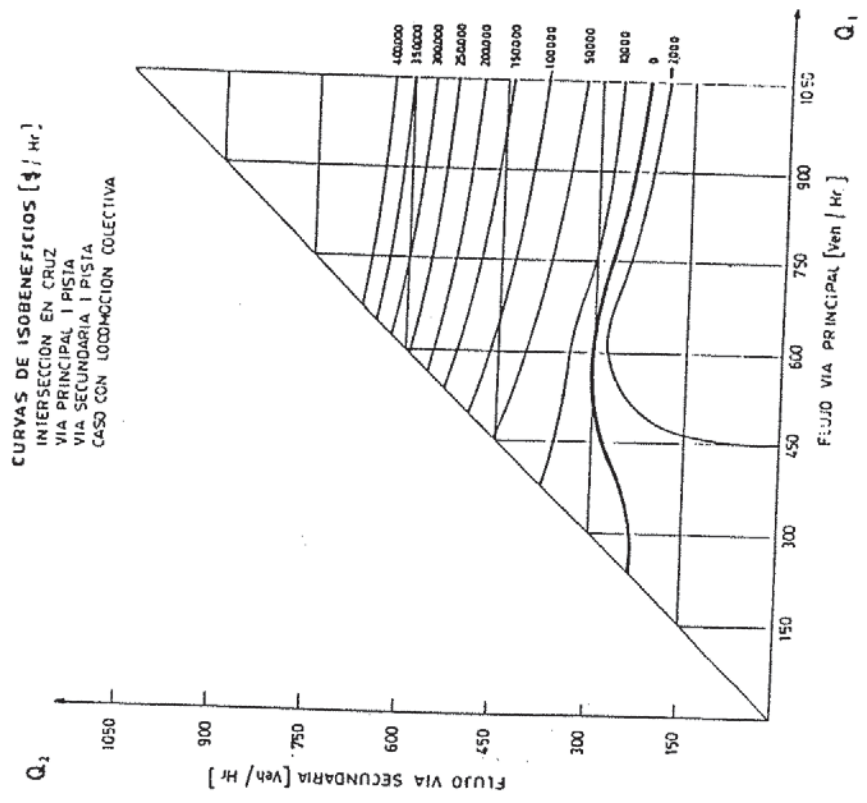


Fig. 5.2

CURVAS DE ISOBENEFIICIO (\$ / Hr)
INTERSECCION EN CRUZ
VIA PRINCIPAL 1 PISTA
VIA SECUNDARIA 2 PISTAS
CASO SIN LOCOMOCION COLECTIVA

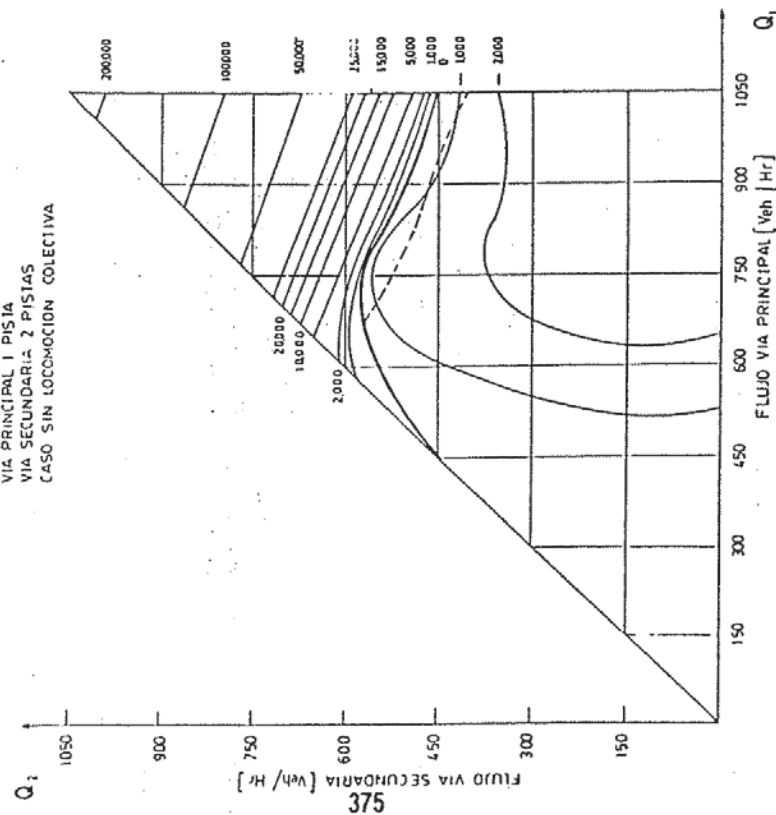


Fig. 5.3

CURVAS DE ISOBENEFIICIO (\$ / Hr)
INTERSECCION EN CRUZ
VIA PRINCIPAL 1 PISTA
VIA SECUNDARIA 2 PISTAS
CASO CON LOCOMOCION COLECTIVA

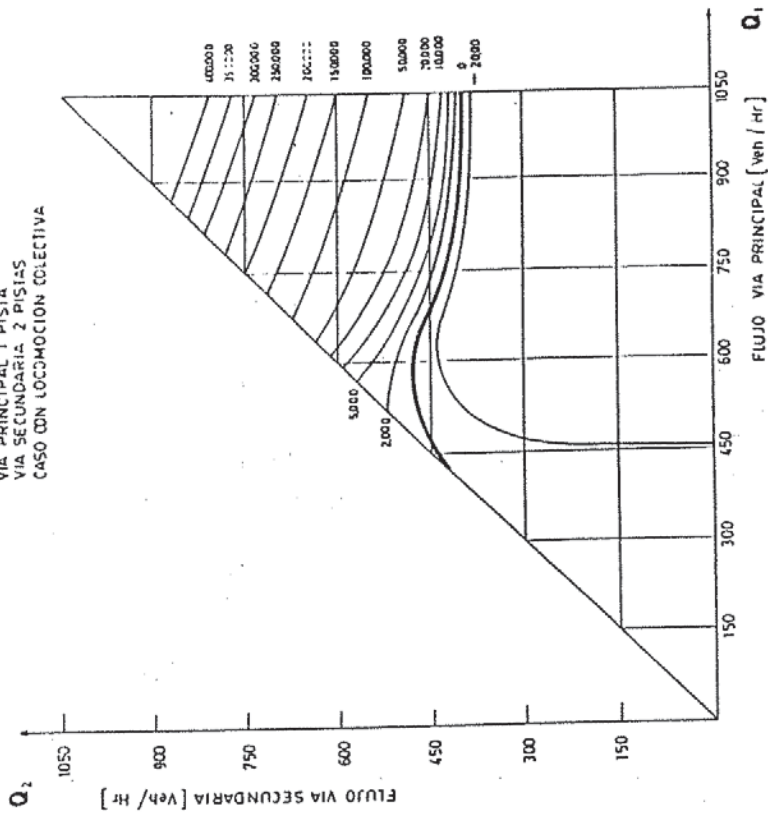


Fig. 5.4

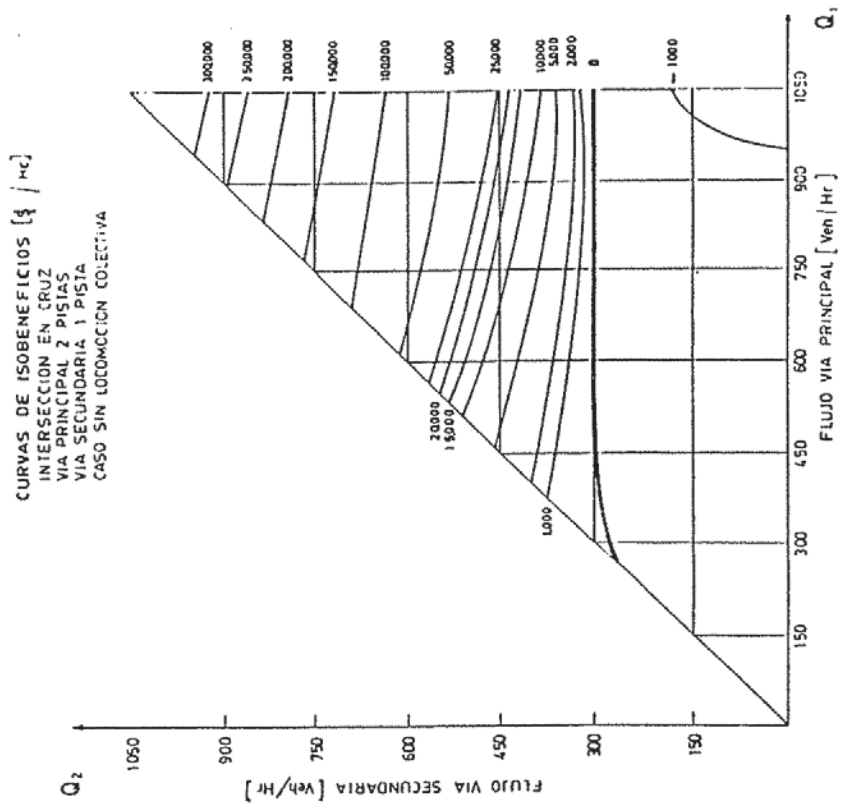


Fig. 5.6

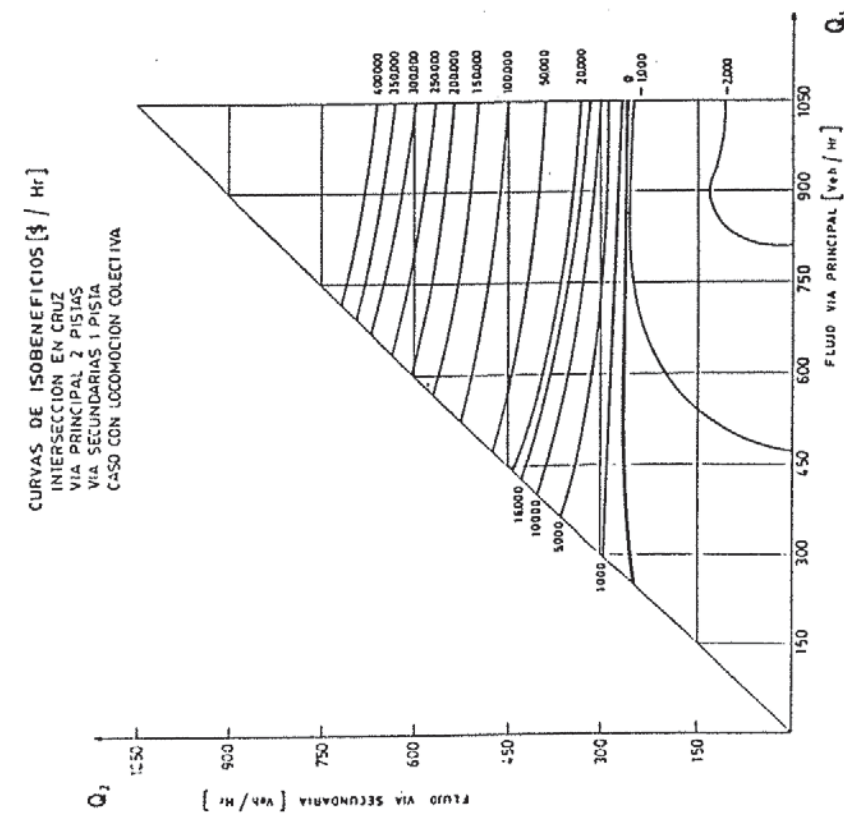


Fig. 5.5

CURVAS DE ISOBENEFICIOS [\$ / Hr]
 INTERSECCION EN CRUZ
 VIA PRINCIPAL 2 PISTAS
 VIA SECUNDARIA 2 PISTAS
 CASO SIN LOCOMOCION COLECTIVA

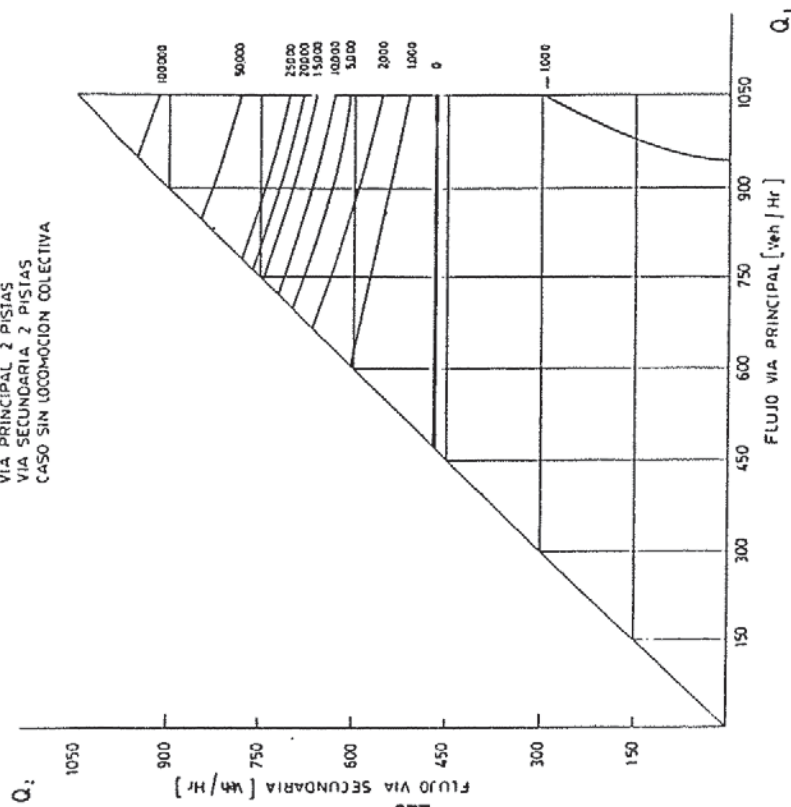


Fig. 5.7

CURVAS DE ISOBENEFICIOS [\$ / Hr]
 INTERSECCION EN CRUZ
 VIA PRINCIPAL 2 PISTAS
 VIA SECUNDARIA 2 PISTAS
 CASO CON LOCOMOCION COLECTIVA

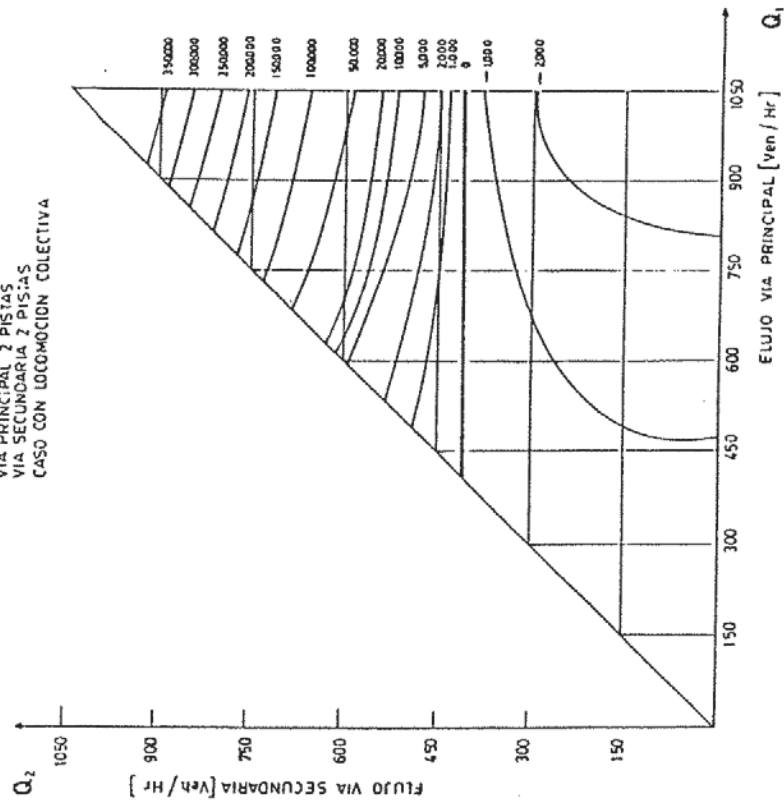


Fig. 5.8

