

SELECCION DE LA LOCOMOTORA DIESEL-ELECTRICA OPTIMA

Margaret Müller *

Maria Cristina Fogliatti de Sinay **

Antonio Carlos Tancredo ***

Resumen

El objetivo del presente trabajo es el de proponer un procedimiento técnico-económico con el que se pueda especificar la locomotora diesel-eléctrica, y en consecuencia el tren, que transporte una carga dada por una ferrovía de características conocidas, al menor costo. La locomotora escogida será denominada "óptima".

Por ser muchos los factores que influyen en el desempeño de una locomotora, (sus características técnicas, manera de conducir del maquinista, características de la demanda, de la vía, etc), y por ser muy difícil la avaluación numérica de los mismos, después de una revisión bibliográfica extensa, se optó por escoger como parámetros o variables de decisión que irán a representar a la locomotora óptima, los siguientes: y_1 : potencia bruta, y_2 : peso adherente, y para decidir la formación del tren óptimo y_3 : número de locomotoras.

Seleccionadas estas variables, fue definida analíticamente una función que representa el costo anual de transporte en las variables de decisión que varían en intervalos restrictos por condiciones técnicas y operacionales. Esas condiciones consisten básicamente en respetar el intervalo de variación de la velocidad de régimen continuo e impedir que el número de trenes por día y por sentido, supere la capacidad práctica de circulación diaria de trenes de la vía.

Con la finalidad de resolver problemas numéricos, fue desarrollado un programa en lenguaje Fortran en el que son conjugados el proceso de búsqueda exploratoria de Hooke y Jeeves y el Método de las Penalidades.

Finalmente, algunas aplicaciones del procedimiento en ferrovías brasileras fueron realizadas.

* FINEP/MINISTÉRIO DE CIÊNCIA Y TECNOLOGIA
** - INSTITUTO MILITAR DE INGENIERÍA
*** - ENEFER S.A.

1.- Generalidades: La siguiente premisa fue estipulada para desenvolver el trabajo: "El tren será dimensionado para vencer los trechos de greide crítico, rebocando la máxima carga posible en velocidad de régimen continuo. (El valor de esta velocidad será dado por la intersección de las curvas de esfuerzo tractor y de adherencia)".

Las siguientes consideraciones fueron necesarias para simplificar el trabajo:

1- La ferrovía deberá tener características geométricas previamente definidas, ser simple y no precisar de duplicación.

2- Esa ferrovía presentará confiabilidad operacional, lo que asegurará el cumplimiento de los programas de transportes.

3- El trabajo será desenvuelto para trenes con único origen y destino y carga unitaria.

Los siguientes parámetros deben ser previamente calculados pues influyen las variables de decisión:

1- El coeficiente de adherencia en el contacto de la rueda y el riel en la partida del tren, n_0 : Este parámetro depende de la calidad de la vía y del avance tecnológico de las locomotoras. Cuanto mayor es su valor, menor es el peso de adherencia requerido pudiendo, por lo tanto, ser menor el peso de la locomotora, mayor el aprovechamiento útil del transporte y menor el desgaste de la vía; proporcionará también mayores esfuerzos de tracción lo que se traducirá en trenes más largos. Influye directamente en la variable y_2 .

2- La eficiencia de la transmisión de potencia del motor diesel a las ruedas de la locomotora, E_f : Influye en la variable y_1 y es calculado con la relación potencia en la rueda/potencia en el motor diesel.

3- El greide crítico compensado para el dimensionamiento del tren, I_c : Influye en la determinación de la lotación del tren y por lo tanto, en el aprovechamiento de la capacidad de tracción de la locomotora.

4- Vida útil de las locomotoras y vagones: pueden ser adoptados valores medios estimados por la práctica ferroviaria.

5- Consumo específico de combustible.

2. Restricciones de las Variables de Decisión

Las variables de decisión, y_1 e y_2 , deben restringirse al intervalo de variación de la velocidad de régimen continuo, VRC, dada por Müller (1984):

$$VRC = \frac{273,24 \text{ Ef. } y_1}{1000 n_0 y_2^{-0,01 \times 273,24 \text{ Ef. } y_2}}$$

Baseándose en la experiencia de técnicos del sector, se estimó el límite inferior de VRC en torno de 10 Km/h y el superior, que no debe sobrepasar la velocidad máxima permitida, deberá ser estimado para cada vía en particular.

El número de trenes por día por sentido es función de y_1 , y_2 y y_3 y está limitado superiormente por la capacidad práctica de circulación diaria de trenes en la misma. Esta capacidad, Cap, es calculada con la fórmula de Colson (Tancredo, 1974):

$$Cap = \frac{KDL \cdot KUL \cdot 1440}{(t_i + t_p) + \theta}$$

donde KDL = constante de disponibilidad de la vía.

KUL = constante de utilización efectiva de la vía.

$(t_i + t_p)$ = suma de los tiempos de viaje del tren en los dos sentidos, en la sección crítica.

θ = tiempo medio gastado en licenciamento, aceleración y desaceleración del tren, en minutos.

3. La Función Costo Total de Transporte

El objetivo de este trabajo es especificar la locomotora diesel eléctrica óptima, entendiéndose por esta, aquella que realiza el transporte de una carga en una ferrovía de características conocidas, al menor costo.

Es necesario entonces definir una relación que represente ese costo en función de las variables de decisión. Esa función es definida a seguir:

$$F = C1 + C2 + C3 \quad (1)$$

siendo F: Costo total anual del transporte

C1: Costo anual de amortización e intereses en relación a inversiones en locomotoras y vagones.

C2: Costo anual de la operación de trenes

C3: Costo anual de amortización e intereses de las inversiones y mantenimiento de la vía permanente y de terminales.

Cada una de estas tres parcelas será descripta como función de las variables de decisión para lo que serán usadas fórmulas consagradas por la práctica ferroviaria. Cabe notar que la adopción de otras fórmulas equivalentes, no altera la filosofía del trabajo.

La parcela C1, dada por Pillar (1983):

$$C1 = Fl.Pl.FRCl + Fv Pv FRCv \quad (2)$$

donde Fl, Fv = flota total de locomotoras (vagones) necesaria para cumplir un programa de transportes.

Pl, Pv = precio de adquisición de locomotoras (vagones)

FRCl, FRCv = factor de recuperación del capital con interés TX% en la vida útil de la locomotora (vagón)

$$\text{con } Fl = \frac{PTD.CTl.y3 \cdot 365}{CUDl. \text{ año}} ;$$

$$Fv = \frac{PTD.CTv. y3 \cdot 365}{CUDv. \text{ año}} ;$$

$$\text{y } FRC_j = \frac{TX (1+TX)^{vidaj}}{(1+TX)^{vidaj} - 1} ; \quad j = \begin{matrix} \text{locomotora} \\ \text{vagón} \end{matrix}$$

La siguiente expresión para Pl (en dólares):

$$Pl = 28.722 y_1^{0,4427} y_2^{0,1209}$$

se obtuvo por regresión a partir de datos fornecidos por la Directoría Comercial de la Red Ferroviaria Federal do Brasil. Esos datos así como la regresión están presentados en Müller (1984).

- Y
- PTD = pares de trenes por día
- CT_ℓ, CT_v = ciclo total de la locomotora (vagón) en días
- CUD_ℓ, CUD_v = coeficiente de utilización x coeficiente de disponibilidad de la locomotora (vagón)
- año = número de días de operación por año
- TX = interés de oportunidad de mercado
- vida_j = vida útil del equipamiento en años

De Tancredo (1974) y Elbrond (1969), se tiene:

$$PTD = \frac{PG}{y^3 \text{ Lot. Lv. año}}$$

y

$$CT_j = TDIR \left[1 + \left(\frac{0,25 \text{ TDIR}}{E_i - 1} + TC \right) PTD \right] + \sum_t C_{t,j}$$

$j = \begin{matrix} \text{locomotora} \\ \text{vagón} \end{matrix}$

- siendo
- PG = programa anual de transporte, en t
- Lot = lotación de una locomotora en vagones
- Lv = lotación de un vagón en t
- TDIR = tiempo de viaje directo, ida más vuelta sin paradas en días
Debe ser calculado como función de y_1 e y_2 en cada caso en estudio.
- TC = tiempo de licenciamento en días
- $C_{t,j}$ = tiempo medio de retención de la locomotora (vagón) en el terminal t, en días.
- E_i = número de estaciones de la configuración i que se está usando.

Finalmente, a partir de Brina (1982):

$$\text{Lot} = \frac{(1000 n_0 y_2^{-0,01} \times 273,24 E_f y_2) - (10IC + RN_\ell) y_2}{(10IC + RN_v) T_v}$$

- donde
- Tv = peso del vagón, en t
- y
- $RN_{\ell, v}$ = resistencia normal de la locomotora (vagón)

siendo (Brina, 1982)

$$RN_{\ell,v} = 0,3 + \frac{9.072 \text{ ENE } \ell,v}{WG_{\ell,v}} + 0,00311 V + \frac{0,01226 V^2}{WG_{\ell,v}}$$

con $\text{ENE } \ell,v$ = número de ejes de la locomotora (vagón)
 $WG_{\ell,v}$ = peso de la locomotora (vagón) en t
 V = velocidad del tren adoptada igual a la de régimen continuo, en Km/h

Substituyendo estas expresiones en (2), se tiene:

$$C1 = C1 (y_1, y_2, y_3)$$

La parcela C2 será definida por:

$$C2 = \sum_{i=1}^5 C2_i \quad (3)$$

siendo $C2,i$ = costo anual de manutención de locomotoras y vagones ($i=1$); de combustible ($i=2$); de lubricantes ($i=3$); de personal de tracción ($i=4$) y del personal de las estaciones ($i=5$).

Siguiendo recomendaciones de técnicos del área, se adoptará:

$$C2,1 = 0,30 C1 \quad \text{y} \quad C2,3 = 0,05 C2,2$$

De Tancredo (1974), y Elbrond (1969), se tiene:

$$C22 = (CDIR + \left(\frac{0,25 \cdot TDIR}{Ei-1} + TC \right) TDIR \cdot PTD \cdot COVAZ) PTD \cdot \text{año} \cdot PUC \cdot y_3$$

y de Müller (1984):

$$C2,4 = CT\ell \cdot PTD \cdot \text{año} \cdot CDT$$

$$C2,5 = Ei \cdot \text{año} \cdot CDE$$

donde: CDIR = consumo directo de la locomotora, ida más vuelta en litros. En cada caso deberá ser expresada en función de y_1 e y_2 .

COVAZ = consumo específico medio de combustible por locomotora, en vacío, en ℓ/h .

PUC = precio del combustible por litro.

CDT = costo diario del personal de operación

CDE = costo diario del personal de estación

Substituyendo estas ecuaciones en (3) se tiene:

$$C2 = C2(y_1, y_2, y_3)$$

La parcela C3 puede ser definida como:

$$C3 = SDAM_i(TIM + INFRA) + (LDIM(TIM + INFRA) + 2 AMV + EDIF) NDi \quad (4)$$

con TIM = costo anual de amortización e interés en investimento y manutención de la superestructura, por Km de vía.

INFRA = idem para la infraestructura

AMV = idem para un aparato de cambio de vía

EDIF = idem para edificaciones (estación y residencias) por estación implantada.

NDi = número de desvíos implantados en la configuración i

LDIM = largura total de un desvío a ser implantado, en Km.

SDAMi = ampliaciones necesarias en desvíos de una vía en la configuración i, en Km

Por otro lado, se tiene (Müller, 1984):

$$SDAM_i = \sum_{L=1}^{E_i} ((JF.COMPT) - DESV(L, i)) / 1000$$

$$LDIM = (JF.COMPT + 2 DCH) / 1000$$

$$TIM = 1,265 \sum_{i=1}^4 a_i FRC_i$$

$$INFRA = b1.FRC5$$

$$AMV = b2.FRC6$$

$$EDIF = b3.FRC7$$

y

- donde
- JF = coeficiente de seguridad para la frenada
 - DESV(L,i) = largura útil del desvío L de la configuración i, en m
 - COMPT = largura media de un tren, en m.
 - DCH = distancia entre la aguja del aparato de cambio de vías, hasta la marca del desvío, en m
 - ai = investimento necesario para la substitución total, (material y servicios) de rieles (i=1), durmientes (i=2), lastro (i=3) y otros materiales metálicos (i=4), por Km de vía .
 - FRC_i = factor de recuperación de capital al interés TX % en la vida útil de rieles (i=1), durmientes (i=2), lastro (i=3) y otros materiales metálicos (i=4) y de investimento en infraestructura (i=5), aparatos de cambio de vías (i=6) y en edificaciones (i=7).
 - bi = investimento en infraestructura (i=1) por Km de vía , en substitución total de un aparato de cambio de vía (i=2) y en edificaciones por estación implantada (i=3).

Finalmente

$$\text{COMPT} = y_3 (\text{CM}_\ell + \text{CM}_v \cdot \text{Lot})$$

donde $\text{CM}_{\ell, v}$ = largura media de una locomotora (vagón).

Substituyendo estas expresiones en (4) se tiene:

$$C3 = C3 (y_1, y_2, y_3)$$

De la substitución de cada una de las parcelas C1, C2 y C3, en (1) después de descriptas TDIR e CDIR (por simulación y regresión , por ejemplo) como función de las variables de decisión se observa que:

$$F = F (y_1, y_2, y_3)$$

siendo esta relación no lineal y estando las variables y_i sujetas a las restricciones mencionadas en el item 2 .

4. Solución Numérica y Aplicaciones

Para la solución numérica de este tipo de problema fue desarrollado un programa en lenguaje Fortran, basado en el Método de las Penalidades combinado con el proceso de búsqueda de Hooke e Jeeves. Una descripción detallada de los mismos, puede ser encontrada en Novaes (1978), Lumberger (1973) y Zangwill (1969).

El programa desarrollado, esquematizado en el fluxograma de la Figura 1, se encuentra integralmente incorporado en Müller (1984).

Visando testar el procedimiento numéricamente, algunas aplicaciones en las ferrovías brasileras fueron realizadas. A título de ejemplo se presenta en el Apéndice 1 un resumen de los datos de una ferrovía y su transporte, principales parámetros necesarios para la aplicación del modelo y los resultados que se obtuvieron. Esta aplicación es desarrollada con mayores detalles en Müller (1984).

5. Conclusiones

De la aplicación del procedimiento propuesto en algunas ferrovías brasileras, se pudieron retirar las siguientes observaciones:

. El esfuerzo tractor disponible en la partida y cuando el tren viaja en baja velocidad, es responsable por el peso máximo que la locomotora puede traccionar (deberá superar las resistencias totales de partida y de rampa). Será mayor cuanto mayores sean el coeficiente de adherencia y el peso de la locomotora.

. La potencia utilizada en el contacto rueda-riel, es responsable por el tiempo que una locomotora irá a necesitar para traccionar un tren en un determinado trecho. En el caso de trenes de carga la disminución de tiempo que se obtiene con la elevación de aquella potencia, muchas veces no es significativa si comparada con el ciclo total (tiempo en terminales, atrasos de circulación y cruzamientos, etc). La ganancia más notable, en tiempo, se da en los trechos de greide crítico ascendente que normalmente representan un porcentaje muy pequeño de la extensión total de la vía.

. El par de valores: velocidad de régimen continuo y velocidad máxima en la rueda de la locomotora es determinada por la relación de transmisión. Con siderándose que valores pequeños de la velocidad de régimen continuo se traducen en mayores esfuerzos de tracción en las ruedas de las locomotoras y que los trazados brasileiros limitan la velocidad máxima de los trenes de carga a aproximadamente 60 Km/h, se concluye que deberían ser especificadas relaciones de transmisión bien mayores de las que están siendo usadas.

. Características físicas de la vía que limitan el tamaño del tren o el convivio de trenes de carga y de pasajeros en la misma vía de circulación, son factores que inducen a un aumento de la velocidad de las locomotoras, para lo que sería necesario elevar sus potencias.

. En resumen, es necesario dar más atención a las especificaciones técnicas de las locomotoras, visando compatibilizarlas con la naturaleza del transporte, obteniéndose con esto, mejor desempeño que se traducirá en menores costos de transporte.

Referencias

- BRINA, H. L. (1982) Estradas de Ferro, Vol. 2. Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro.
- ELBROND, J. (1969) Os Fenomenos de Espera e a Teoria das Filas Aplicados a Ferrovia. Companhia Vale do Rio Doce, Vitoria, Brasil.
- LUEMBERGER, D. G. (1973) Introduction to Linear and Nonlinear Programming. Addison - Wesley, Reading.
- MULLER, M. (1984) Seleção da Locomotiva Diesel - Eléctrica para o Transporte de Carga. M.C. Tese, Centro de Pesquisa em Transporte, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- NOVAES, A. G. (1978) Métodos de Otimização - Aplicações aos Transportes. Editora Edgar Búcher Ltda, São Paulo, Brasil.
- PILLAR, H.A. (1983) Adequação de Parametros Geométricos em Projectos Ferroviarios. M. C. Tese, Centro de Pesquisa em Transporte, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- TANCREDI, A. C. (1974) Avaliação Economica da Oportunidade de Duplicar uma Estrada de Tráfego Ferroviário. M. C. Tese, Departamento de Engenharia Industrial, Pontificia Universidad Católica de Rio do Janeiro, Rio de Janeiro.
- ZANGWILL, W. I. (1969) Nonlinear Programming: A Unified Approach. Prentice Hall, Nueva Jersey.

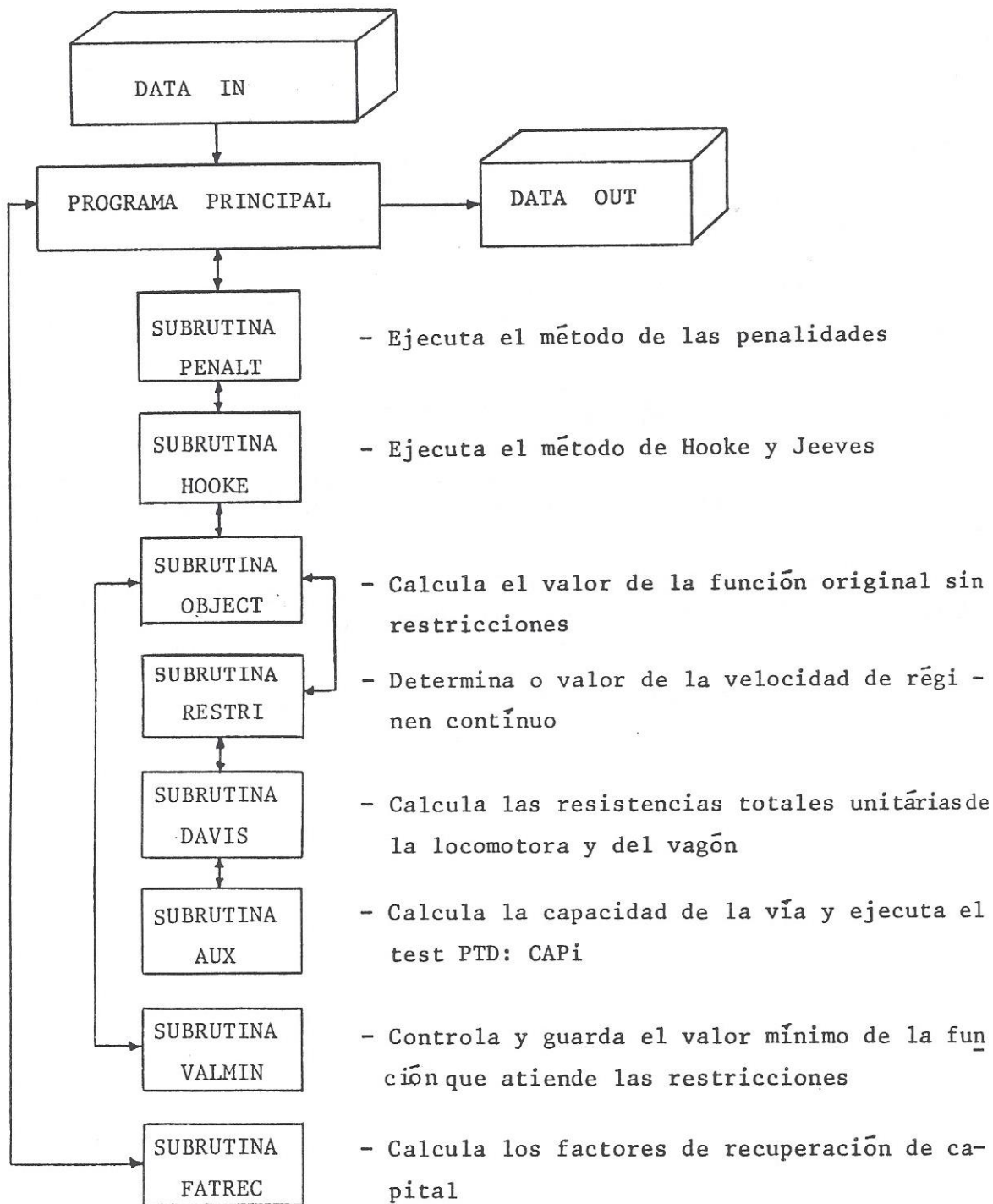


FIGURA 1: Diagrama de bloques del programa

APÉNDICE 1

UN EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL MODELO

1. Datos de la ferrovía:

- Extensión del trecho: 106,604 Km
- Bitola: 1,00 m
- Características Geométricas:
 - . Radio mínimo: 190 m
 - . Rampa máxima: 1,58% ascendente
1,25% descendente
- Carga admisible por eje: 20t
- Velocidad máxima de operación: 60Km/h

2. Datos del Transporte:

- Demanda: 6×10^6 t de carvón mineral
- Vagones seleccionados: góndola abienta
 - . lotación: 58t
 - . tara : 22t
 - . total : 80t
 - . ancho : 15m
 - . área frontal: 7m^2

3. Estimación de los principales parámetros:

- Coeficiente de adherencia en la partida del tren: $n_0 = 0,25$
- Gradiente crítico compensado: $IC = 0,60$ (determinado por simulación)
- Vida útil de los equipamientos:
 - . locomotoras: 20 años
 - . vagones : 20 años
- Consumo específico de combustible:
 - . en marcha: 0,35 lb/GHP/h
 - . parado : 40 lb/h
- Formulaciones de TDIR y CDIR, (determinadas por simulación y regresión):

$$\cdot \text{ TDIR} = 0,3345 y_1^{-0,1984} y_2^{0,1866} \quad (\text{días})$$

$$\cdot \text{ CDIR} = 7,2367 y_1^{0,1060} y_2^{0,8925} \quad (\text{litros})$$

4. Dominio de las variables independientes y de la velocidad de régimen continuo (VRC):

- y_1 : [1000,3000] Hp
- y_2 : [64,120] t
- y_3 : [1,4] locomotoras
- VRC: [10,60] Km/h

5. Resultados conseguidos:

- Características de la locomotora:
 - Potencia: $y_1 = 1390$ Hp
 - Peso total: $y_2 = 120$ t (6 ejes)
 - Velocidad de régimen: VRC = 10,5 Km/h
 - Velocidad máxima: 60 Km/h
- Características de los trenes:
 - Número de locomotoras por tren: $y_3 = 1$
 - Carga: 3000 t brutas (48 vagones)

6. Observaciones

Durante la aplicación numérica se observó que la función de costo propuesta no era unimodal, ie, presentaba diversos mínimos locales, dependiendo del punto de partida escogido.

Para solucionar ese problema, fueron realizadas varias aplicaciones del programa en subáreas del dominio total. El resultado mostrado, corresponde al menor valor de costo conseguido en las diversas subáreas.

EVALUACION PRELIMINAR DE ALTERNATIVAS EN ESTUDIOS DE
PROYECTO DE VIALIDAD URBANA

Claudio Hohmann
Secretaría Ejecutiva, Comisión de Transporte Urbano

Resumen

La realización permanente de estudios de proyectos de vialidad urbana de diversa índole -i.e. estudios de intersecciones de ámbito local, estudio de mejoramiento de ejes y redes de tránsito- ha impulsado la utilización de nuevas herramientas técnicas para el análisis y modelación de soluciones viales, así como también ha incentivado cada vez más la incorporación de consideraciones urbanísticas en la generación y análisis de alternativas de solución.

Las nuevas herramientas técnicas puestas en uso han permitido enfatizar aspectos y etapas de los estudios que antes no fué posible acometer plenamente. Así mismo, una consideración más explícita del enfoque urbanístico en el análisis de alternativas ha ido permitiendo armonizar conflictos entre objetivos de fluidez vehicular y urbanísticos, que se suscitan con frecuencia en proyectos de vialidad urbana.

El presente trabajo pretende ilustrar la evolución que ha experimentado la generación y análisis de alternativas de solución en proyectos de vialidad urbana, centrando el interés en la etapa de evaluación preliminar de alternativas, que es donde se ha verificado con mayor intensidad la incorporación de los nuevos elementos de análisis. Para facilitar la comprensión, el trabajo se basa en la experiencia de estudios recientes (particularmente los estudios del Nudo Apoquindo * Manquehue y de conexión vial a través del sitio de CCU).

1. Introducción

Una de las tareas más importantes en los estudios de evaluación de proyectos de vialidad urbana corresponde a la etapa de evaluación preliminar de alternativas.

Cabe tener presente que previo a la evaluación preliminar se lleva a cabo una etapa de diseño preliminar de alternativas, en la cual se desarrolla una gama lo más exhaustiva posible de soluciones. Esta es una tarea típicamente artesanal, en la cual el proyectista pone en juego toda su capacidad creativa para desarrollar diversos esquemas de solución sin más limitación que la de su propia imaginación. Sin embargo, frente a la imposibilidad de estudiarlos profundamente a todos y sabiendo que unos se comportan distintos que otros en cuanto a la bondad de la solución y sus impactos, se intenta a través de un proceso de descarte seleccionar uno o varios de ellos para ser modelados y evaluados como anteproyectos. Dicho de otra forma, el objetivo de la evaluación preliminar es descartar aquellas soluciones menos prometedoras y garantizar que las que pasan a la etapa siguiente son las mejores del conjunto de alternativas desarrolladas en la etapa de diseño preliminar.

El grado de profundidad al que debe llegar la evaluación preliminar depende en gran medida del tipo de proyecto en estudio, y por cierto del número y diversidad de las soluciones propuestas en la etapa de diseño preliminar. Es evidente que algunas soluciones pueden ser analizadas utilizando procedimientos manuales y/o aplicando criterios urbanísticos que permiten explorar satisfactoriamente sus ventajas y desventajas. Cuando los resultados de este ejercicio son concluyentes en cuanto a la inferioridad del esquema analizado, es posible descartarlo en ese momento y privilegiar el estudio más detallado de alternativas mejores. Sin embargo, cuando entre estas últimas existen dos o más cuyas bondades son comparables, no siendo posible estimar manualmente en forma confiable sus costos y beneficios, se hace necesario utilizar herramientas de modelación o simulación que permitan seleccionar de entre ellas las que habrán de pasar a la etapa de anteproyecto.

El presente trabajo analiza en detalle los avances que se han experimentado en la etapa de evaluación preliminar en estudios de proyectos de vialidad urbana, centrando el interés en la forma como se están utilizando las nuevas herramientas de análisis en diversos proyectos realizados recientemente por la Comisión de Transporte Urbano (Secretaría Ejecutiva).

2. Descripción y Evolución de la Etapa de Evaluación Preliminar de Alternativas en Estudios de Proyectos de Vialidad Urbana

La evaluación preliminar de alternativas de solución ha ido cobrando cada vez más importancia en los estudios de evaluación de proyectos de vialidad urbana realizados desde 1981 a esta parte.

En los primeros estudios realizados en 1981 la evaluación preliminar consiste básicamente en un análisis cualitativo de los diseños preliminares, en el cual se consideran entre otros los siguientes aspectos:

- a. Comparación de las alternativas desde el punto de vista de tránsito: se reconoce que los diseños preliminares se orientan esencialmente a resolver problemas de tránsito, y por lo tanto, es necesario medir la bondad de los diseños preliminares en cuanto a su efectividad para solucionar dichos problemas. Como exigencia básica, los diseños en consideración deben proveer una reserva de capacidad satisfactoria (se acepta como razonable proveer una reserva de capacidad de 50%, es decir, capacidad de los esquemas suficiente como para acomodar un incremento del 50% en los niveles de flujos observados en los períodos considerados).

Los elementos que se toman en cuenta para estimar la efectividad de las soluciones son los siguientes:

- fluidez del tránsito vehicular: comprobar que todos los movimientos tienen una solución lógica y que no se obstruyen mutuamente.
 - interferencias a la locomoción colectiva: comprobar que se provee espacio suficiente para paraderos y que las maniobras de la locomoción colectiva al utilizarlos no generan fricción con otros movimientos de vehículos.
 - interferencias a los peatones: comprobar que la situación de los peatones no desmejora y que se da adecuada solución a sus problemas si es que existen.
- b. Relación con el espacio urbano circundante: se intenta analizar los esquemas desde un punto de vista urbanístico analizando la importancia y tipo de expropiaciones (si las hay); la importancia de los cambios que eventualmente puedan producirse en el uso de suelos característico del área de estudio; y como contribuye el esquema analizado a mejorar la calidad ambiental del área.
 - c. Flexibilidad de la solución: consiste en analizar el esquema en cuanto a sus posibilidades de adaptarse a cambios en la estructura de la demanda en el área de estudio o cambio en el uso de suelos, y las rigideces que él impone al área afectada.

En general, es posible advertir en el procedimiento de evaluación preliminar reseñado la imposibilidad de cuantificar aunque sea en forma aproximada los costos y beneficios (pero esencialmente estos últimos) asociados a las distintas soluciones. Esto no tiene gran importancia cuando las alternativas son pocas, y las soluciones son simples y muy diversas unas de otras. Pero, este no es el caso en una gran cantidad de situaciones cuya complejidad da lugar a un conjunto de soluciones complejas que para ser juzgadas requieren ser analizadas con más profundidad. Debe tenerse presente que lo que se persigue cuando se desea dar una solución a un problema de tránsito es mejorar las condiciones de operación en el área de estudio; y el mejoramiento estriba básicamente en ahorros de tiempos de los usuarios y ahorros de costos de operación (existen otras mejoras que no es el caso discutir aquí como disminución de accidentes, disminución de la contaminación ambiental, etc). Dichos ahorros son cuantificables, y de hecho constituyen la principal fuente de beneficios que se contabilizan en la evaluación de proyectos en vialidad urbana.

Por lo tanto, cuando las alternativas son numerosas y es imposible discriminar entre ellas aplicando el procedimiento de evaluación preliminar utilizado en los estudios de 1981, es necesario ampliar el nivel de análisis e intentar una estimación cuantitativa de los ahorros de tiempo y costos de operación que producen los diseños preliminares en cuestión, para posibilitar su comparación en términos de la relación costo-beneficio.

Esto es lo que se ha venido haciendo en recientes estudios de proyectos en vialidad urbana, habida cuenta que en no pocos casos es la única forma de comprobar las supuestas bondades de los diseños preliminares y seleccionar aquellos que son más prometedores para la etapa de anteproyecto.

La cuantificación de costos y beneficios asociados a distintos diseños preliminares permite además la consideración de aspectos urbanísticos en forma más eficiente, puesto que es posible desde ya evaluar las ventajas y desventajas de los esquemas en cuanto a los costos y beneficios que implica respetar determinadas restricciones o criterios urbanísticos. Cuando no se cuantifica la bondad de las distintas soluciones preliminares y la selección de alternativas se realiza en base a un procedimiento básicamente cualitativo, es claro que el conflicto entre objetivos de fluidez vehicular y criterios urbanísticos -eminentemente cuantitativos- se torna más difícil de zanjar. En cambio, la mayor información cuantitativa que se puede obtener respecto del comportamiento de las soluciones contribuye sensiblemente a clarificar dicho conflicto (cuando éste se plantea). En definitiva, la modelación de los diseños preliminares -aunque no con el rigor de la etapa de anteproyecto- contribuye a mejorar las decisiones que se toman en una etapa crucial de los estudios, o por lo menos tiende a evitar que diseños preliminares prometedores sean descartados equivocadamente.

3. La Modelación en la Etapa de Evaluación Preliminar

La utilización cada vez más frecuente de modelos computacionales para simular la operación de un dispositivo vial o de una red de tránsito, ha ido ampliando considerablemente el conocimiento y manejo de tales herramientas en estudios de transporte urbano. En los estudios de 1981 se comenzó a usar el modelo TRANSYT para simular y optimizar redes de semáforos. Más adelante se incorporó el modelo TRAFFICQ para simular redes en las cuales existe congestión y se observan situaciones de bloqueos de intersecciones (esto es, problemas de capacidad de almacenamiento en arcos cortos), que no podían ser analizados en el modelo TRANSYT. Más recientemente se ha comenzado a utilizar el modelo de gestión de tránsito SATURN, que permite simular situaciones donde, como resultado de un proyecto determinado, se espera que se produzcan importantes reasignaciones de flujos en la red. Estos modelos en los casos donde son aplicables se han constituido en herramientas indispensables para analizar la operación de las situaciones sin y con proyecto definidas en los estudios.

Sin embargo, sólo últimamente han comenzado a ser usados en la etapa de evaluación preliminar, en la medida que se ha superado la fase de aprendizaje y se ha facilitado gradualmente su manejo. Por otra parte, la etapa de evaluación preliminar ha ido haciéndose cada vez más compleja, al reconocerse la gravitación que tienen las decisiones adoptadas en ese nivel de avance de los estudios. Cuestiones tales como la cantidad de diseños preliminares que pueden pasar a la etapa de anteproyecto (generalmente uno o dos), y de que tipo (en superficie, desnivelaciones, reruteos, etc.) deben ser dilucidadas en ese momento. Dado que la experiencia muestra que generalmente no se justifica -ni es económicamente conveniente- analizar a nivel de anteproyecto más de dos diseños preliminares, cobra gran importancia seleccionar del conjunto de diseños preliminares los de mejor rendimiento. Una equivocación en esto podría significar, por ejemplo, que se estudie a nivel de anteproyecto una alternativa no rentable, existiendo otras que pudieran serlo, o eliminar en el proceso de descarte alguna alternativa rentable.

Los costos asociados a cada diseño preliminar pueden ser estimados sin mucha dificultad para alcanzar un nivel de aproximación de $\pm 20\%$ del monto de inversión. Sin embargo, la estimación de beneficios presenta mayores complicaciones aún tratándose de un nivel preliminar de análisis. Como se ha dicho antes, simplemente no es posible estimar mediante métodos aproximados (procedimientos manuales, por analogía, etc.), los consumos de tiempo y combustible que se verifican en una red de tránsito de cierta complejidad. Por lo tanto, es necesario emplear los modelos de simulación mencionados anteriormente. Como se trata de evaluar diseños preliminares, el grado de exigencia en cuanto al uso de los modelos es menor que cuando son usados en la evaluación de anteproyectos. Por ejemplo, se puede admitir como suficiente a este nivel, un análisis del comportamiento de las soluciones para un sub-conjunto de los períodos considerados en el estudio (por ejemplo los períodos punta en día hábil). Así mismo, en lugar

de analizar los consumos de recursos arco por arco, que es lo exigido en la etapa de evaluación definitiva, se pueden considerar los totales de consumo de recursos entregados por el modelo utilizado. También se pueden admitir otras simplificaciones: por ejemplo, se pueden estimar los consumos de combustible correspondientes a la velocidad promedio de los flujos vehiculares en la red (calculada por el modelo), o adoptar una tasa de ocupación promedio para la red. Cuando es necesario emplear combinadamente dos modelos -típicamente SATURN y TRANSYT-, caso en el cual se genera un proceso iterativo cuya convergencia se alcanza luego de varias iteraciones, se pueden aceptar 2 ó 3 iteraciones entre los modelos asumiendo que para efectos de evaluación preliminar el grado de convergencia alcanzado es suficiente.

En todo caso, las simplificaciones que puedan realizarse en la evaluación no debieran menoscabar la confiabilidad de los resultados, especialmente si se considera que se aceptan dado el carácter preliminar del análisis, y el propósito discriminatorio que tiene el procedimiento de comparar los diseños preliminares según la relación costo/beneficio. En otras palabras, no interesa tanto afinar la magnitud de la rentabilidad de los diseños preliminares (para lo cual si es im prescindible modelar detallada y desagregadamente), sino obtener una medida comparativa de las bondades de cada uno de ellos.

4. Aspectos Urbanísticos en la Evaluación Preliminar

Si bien los problemas de tránsito deben ser enfrentados necesariamente desde un punto de vista técnico, no puede olvidarse que las soluciones a ellos tiene efectos que obviamente trascienden al campo meramente técnico. Sería un error desconocer la evidente relación que existe entre un diseño vial determinado y un conjunto de factores involucrados en el problema, algunos de los cuales simplemente no pueden ser reducidos a categorías técnicas. Dicho de otro modo, ciertos aspectos del diseño vial no son susceptibles de ser cuantificados y ni siquiera el análisis de ellos ha podido ser convenientemente sistemático. Entre esos factores, tienen particular relevancia los que podríamos llamar "aspectos urbanísticos", insoslayables en la problemática del diseño vial. Con frecuencia, la consideración de ciertos fundamentos y valores así llamados urbanísticos abre campo a un conflicto entre objetivos que es preciso armonizar a la luz de un criterio integrador que permita la incorporación de los distintos enfoques (por un lado, la optimización de la función transporte y por otro la satisfacción de planteamientos urbanísticos).

Sin embargo, finalmente el aspecto rector de la optimización -ya sea de aspectos urbanísticos o de fluidez vehicular- es el económico, de cuyo campo surgen los métodos para evaluar las alternativas posibles. Al reconocer la existencia de factores que son del orden más cualitativo que cuantitativo, es preciso entonces situar el problema dentro de un espectro más amplio, a pesar de que en definitiva la influencia de tales factores no podrá quedar reflejada en el análisis cuantitativo.

Por lo mismo, la consideración de aspectos urbanísticos es de la mayor importancia especialmente en la etapa de evaluación preliminar, toda vez que corresponde en ese momento seleccionar aquellos esquemas preliminares más prometedores. De hecho, en esta etapa más que en ninguna otra, los planteamientos urbanísticos deben ser probados -incluso cuantificados, por lo menos en cuanto a sus impactos sobre la función transporte- y analizados interdisciplinariamente. Si esto no se realiza en la etapa de evaluación preliminar, el o los anteproyectos que finalmente sean evaluados, correrán el riesgo de sub-ordinar los aspectos urbanísticos a las necesidades de transporte, que son las que mayoritariamente dan origen a los estudios, recibiendo un tratamiento metodológicamente sistematizado.

El procedimiento de evaluación preliminar utilizado desde 1981 en adelante incorpora al análisis de los diseños preliminares el impacto que estos puedan producir sobre el uso de suelos en el área de estudios y sobre todo el aporte de los diseños al mejoramiento de la "calidad ambiental" general del entorno afectado. Ultimamente, se han añadido otras consideraciones que han ampliado la cobertura de factores urbanísticos: análisis de forma de los sectores afectados, actividades urbanas en el entorno y posibles afecciones a ellas, incentivo o desincentivo en el uso de la vialidad, análisis de capacidad de estacionamientos, etc.

Con todo debe tenerse presente que los aspectos urbanísticos que intervienen en el problema del diseño vial son esencialmente cualitativos. De esta característica derivan problemas prácticos puesto que es imposible desarrollar formas de evaluación conjunta que permita obtener indicadores de eficiencia agregados, tanto en relación con la función transporte como con la satisfacción de planteamientos urbanísticos. Por lo tanto, la valoración que se dé a estos últimos depende en última instancia de un trabajo interdisciplinario mediante el cual se puede lograr un adecuado balance entre los distintos factores.

De esta forma, no sólo es posible enriquecer la evaluación de los distintos diseños preliminares que pueden ser planteados frente a un problema determinado, sino que también armonizar objetivos conflictivos que son contrastados dentro de un contexto en todo caso más técnico y objetivo.

5. Evaluación Preliminar en los Estudios del Nudo Apoquindo/Manquehue

El hecho de que se han realizado dos estudios sobre el nudo Apoquindo/Manquehue ofrece una excepcional oportunidad de comparar el procedimiento seguido en uno y otro caso respecto de la etapa de evaluación preliminar, que es precisamente en lo que ambos se diferencian básicamente.

El estudio realizado para la Comisión de Transporte Urbano en 1981 no incluyó la estimación de beneficios en la etapa de evaluación preliminar, de modo que la selección del prediseño que fue estudiado a nivel de anteproyecto se llevó a cabo atendiendo a las ventajas y desventajas de los distintos diseños preliminares considerados. Así, fueron descartadas posibles desnivelaciones de Manquehue y Cuarto Centenario/Alonso de Córdova (ver Fig. 1), y solamente se consideró la desnivelación de Apoquindo. La más importante de las decisiones en ese estudio fue el descarte en la etapa de evaluación preliminar de una solución a nivel o en superficie, dado que el análisis realizado mostraba que en ninguna de las intersecciones del nudo se podía obtener una reserva de capacidad adecuada. Por lo tanto, se seleccionó finalmente un prediseño que consistió en la desnivelación de Apoquindo mediante un túnel bidireccional de 580 mts. de longitud (incluyendo rampas de acceso), de dos pistas por sentido. Para esta solución no se consideró mas que una alternativa de operación en superficie; vale decir no se analizaron explícitamente sub-alternativas para la operación a nivel.

El estudio realizado para la I. Municipalidad de Las Condes en 1984 fue uno de los primeros en incluir en la etapa de evaluación preliminar de alternativas una instancia de cuantificación de beneficios directos para distintos diseños preliminares.

En dicho estudio se desarrollaron seis alternativas en la etapa de diseño preliminar, de las cuales se descartaron dos recurriendo al expediente del análisis cualitativo. Las alternativas descartadas corresponden a las desnivelaciones de Manquehue y Cuarto Centenario/Alonso de Córdova, que son las mismas descartadas en el estudio anterior. Las cuatro alternativas restantes corresponden a dos soluciones a nivel y dos soluciones a desnivel mediante un túnel en Apoquindo (de longitud algo menor al anterior). Básicamente, los dos esquemas de operación a nivel fueron probados con y sin túnel dando lugar a las cuatro alternativas que fueron modelados en la etapa de evaluación preliminar. Para ello se usaron los modelos TRANSYT (optimización de la red) y TRAFFICQ (simulación detallada). Las salidas de este último fueron utilizadas para realizar la evaluación de los diseños preliminares.

En el caso de las alternativas a nivel se modelaron los períodos punta de la mañana y sábado, ya que correspondían según la información recogida a los más cargados de la semana. En cambio las alternativas a desnivel se modelaron para el período de sábado al mediodía, asumiendo que los flujos en superficie en ese período serían los mayores de

la semana (*).

Todas las alternativas y en los períodos considerados se modelaron primero con TRANSYT a fin de encontrar los repartos y desfases óptimos de los semáforos en la red. Esta información fue luego traspasada al modelo TRAFFICQ para simular la operación de la red. Como resultado de la simulación, el modelo entrega consumos de tiempo y combustible en la red, valores que son utilizados para el cálculo de beneficios de las alternativas con respecto a una alternativa base.

Todas las alternativas en cuestión resultaron rentables, especialmente aquellas que consideraban una solución a nivel. En todo caso, la comparación entre alternativas en superficie y alternativas a desnivel no es del todo simple, si se considera que los montos de inversión en uno y otro caso no guardan relación entre sí, como así mismo las respectivas reservas de capacidad. Así y todo, los indicadores cuantitativos contribuyeron en gran medida a orientar la decisión final de seleccionar para la etapa de anteproyecto una alternativa en superficie y otra a desnivel. De hecho, las alternativas seleccionadas fueron las más rentables de cada grupo (a nivel y a desnivel respectivamente), aunque ciertamente la rentabilidad no fue el único criterio utilizado para la selección de ellas.

Cabe hacer notar que en la oportunidad que se realizó el estudio de 1981, el modelo TRAFFICQ no estaba aún disponible, y recién se estaba introduciendo el uso del modelo TRANSYT. Igualmente, las bases de la metodología de evaluación recién se estaban sentando. Por lo tanto, es lógico que los avances en esta materia y la experiencia adquirida vaya permitiendo perfeccionar el procedimiento, al punto que en la actualidad en la mayoría de los estudios de este tipo se reconoce la necesidad de utilizar modelos computacionales para simular en la etapa de evaluación preliminar.

(*) Se supuso que los períodos punta mañana y punta de sábado representaban cada uno el 15% de los beneficios anuales respectivamente.

6. Evaluación Preliminar en el Estudio de una Conexión a través de los Terrenos de la CCU.

El estudio de una conexión a través de los terrenos de la Compañía de Cervecerías Unidas (que colinda con la Avda. Costanera Andrés Bello) tenía como objetivo básico determinar la localización, el diseño y la conveniencia de habilitar un dispositivo vial que conectara la calle Tajamar -entendida como prolongación de Avda. Tobalaba- con la Avda. Costanera (ver Fig. 2).

Tratándose de una situación en la cual los flujos usuarios de la nueva vía necesariamente deben reasignarse desde otras calles existentes, se utilizó el modelo SATURN para estimar la demanda en la situación con proyecto. La magnitud del área involucrada en la modelación y la repercusión del proyecto sobre la vialidad existente dió origen a un conjunto de alternativas de diseño para la conexión, y a su vez a un conjunto de sub-alternativas de diseño para problemas locales, no necesariamente dependientes de la conexión.

Para evaluar los diseños preliminares de conexión se utilizaron combinadamente los modelos SATURN y TRANSYT. El primero, como se dijo, se usa con el fin de estimar la reasignación de flujos que se produce en la red modelada como consecuencia de cambios en la oferta. La optimización de semáforos se hace con TRANSYT. Sin embargo, las reasignaciones estimadas producen un cambio en la estructura de flujos en los nodos, que hace necesario reoptimizar los semáforos generándose típicamente un proceso iterativo. En este caso, por tratarse de un nivel de evaluación preliminar se realizaron dos iteraciones entre los modelos. Se simuló sólo para el período punta de la mañana.

Las alternativas evaluadas cuantitativamente de ese modo fueron tres. Otras dos fueron descartadas por razones predominantemente urbanísticas, siendo innecesario modelarlas.

Así mismo, para el análisis de sub-alternativas se usó el modelo TRANSYT para cuantificar beneficios. Es el caso por ejemplo de la proposición de separar las calzadas de Avda. Costanera mediante un bandaje central.

Finalmente se evaluó a nivel de anteproyecto un prediseño consistente en una alternativa de conexión seleccionada en la evaluación preliminar y las soluciones locales adoptadas en cada caso, también analizadas cuantitativamente en la evaluación preliminar.

Es importante destacar la importancia de los factores urbanísticos presentés en el problema de habilitar una nueva vía en el sector afectado, atendiendo a su enorme influencia no sólo en cuanto a consolidar una forma específica del terreno de la CCU, sino que a las posibilidades de estimular la accesibilidad a y desde diversas zonas y permitir el desarrollo de nuevas actividades. Estos aspectos fueron exhaustivamente analizados, al punto que algunos diseños preliminares fueron descartados más que nada por razones de índole urbanística.

7. Conclusión

La evaluación preliminar de alternativas ha experimentado en el último tiempo una evolución importante, convirtiéndose en una de las etapas relevantes en estudios de vialidad urbana. Esto ha ido ocurriendo paulatinamente desde que por primera vez -en 1981- se aplicara una metodología donde se consideraba explícitamente un análisis preliminar de soluciones. Si bien las exigencias a este nivel no se han formalizado aún, en la práctica se ha verificado un notable avance en cuanto a la profundidad del análisis necesario para discernir entre diseños preliminares. El mayor grado de profundidad ha sido necesario particularmente en estudios de redes, en los cuales las soluciones propuestas presentan un grado de complejidad mayor que en el caso más simple de proyectos de ámbito local (por ejemplo, la solución de desnivelación en una intersección simple). De hecho, la evaluación preliminar definida en 1981, estaba específicamente orientada a este tipo de proyectos. Sin embargo, cuando el impacto de los proyectos se extiende a una red de intersecciones o nodos más vasta, la complejidad de evaluar distintas alternativas de operación en ella se incrementa más que proporcionalmente. Es así como en estudios recientes, se reconoce este hecho recurriendo al apoyo de herramientas computacionales en la evaluación preliminar, simulando diseños preliminares, para finalmente compararlos en términos de costo y beneficios.

De esta manera, ha sido posible seleccionar aquellos que pasan a la etapa de anteproyecto en forma más confiable, facilitando además la consideración de otros factores involucrados en el problema del diseño vial.

Bibliografía

CITRA LTDA (1985) Estudio de prediseño y evaluación económica de la red vial delimitada por Avda. Costanera sur, El Bosque - Lota - Los Leones. Informe Final a Comisión de Transporte Urbano, Santiago.

EUROPACT, IASA y ECAR (1981a) Proyectos de vialidad urbana: aspectos metodológicos. Informe preparado para la Comisión de Transporte Urbano, Santiago.

EUROPACT, IASA y ECAR (1981b) Prediseño y evaluación económica: Apoquindo/Manquehue. Informe Final a Comisión de Transporte Urbano, Santiago.

NECOCHEA Y RAMIREZ LTDA (1985) Estudio de prediseño y evaluación económica del nudo vial Apoquindo/Manquehue. Informe Final a Comisión de Transporte Urbano, Santiago.

SECTU (1982) Metodología para la Evolución Social de proyectos de Inversión en vialidad urbana. Comisión de Transporte Urbano, Santiago.

VALENZUELA, J. (1984) Manual de vialidad Urbana, vol 3, Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Santiago.

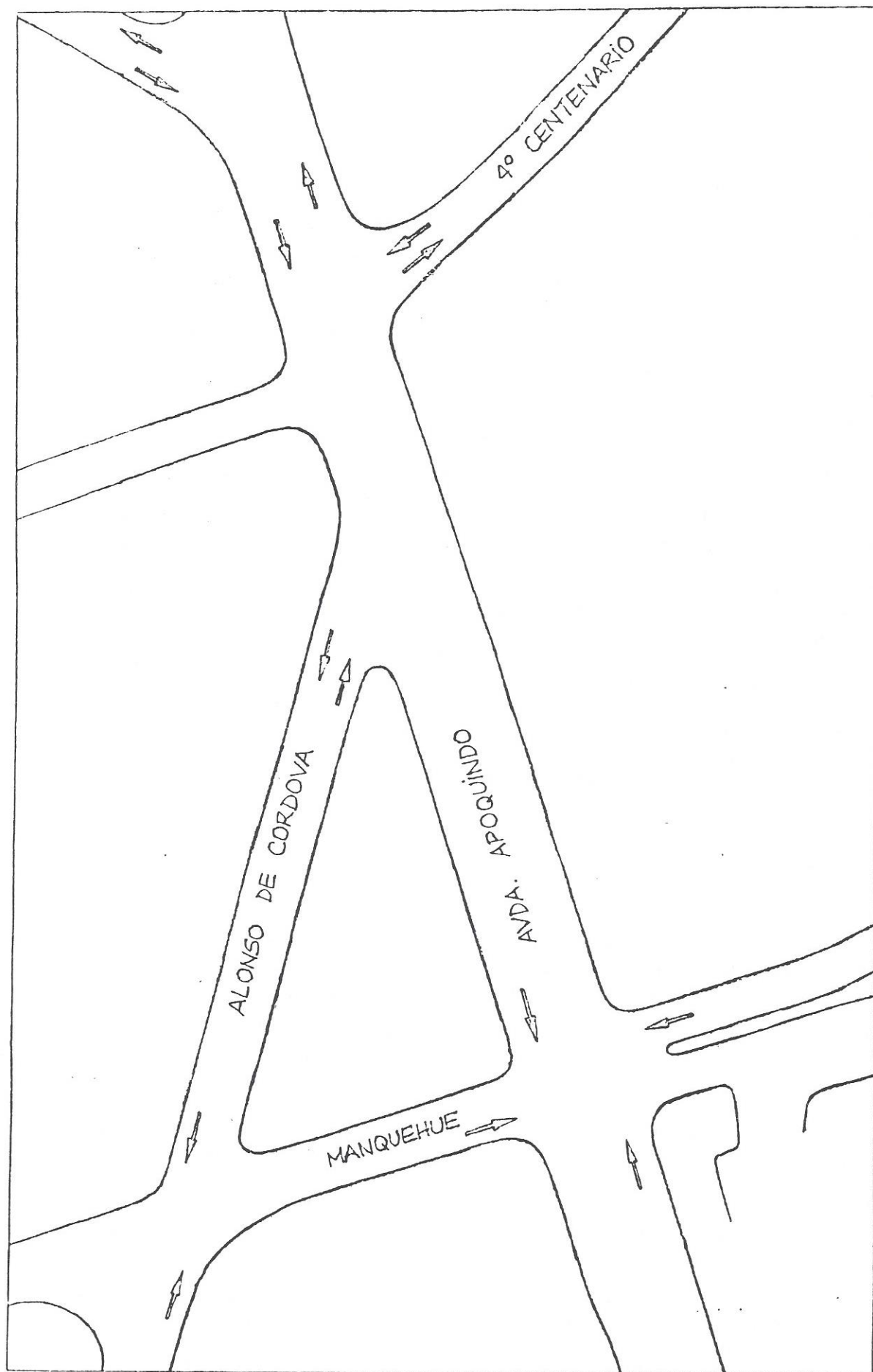


FIGURA 1: Nudo Apoquindo/Manquehue

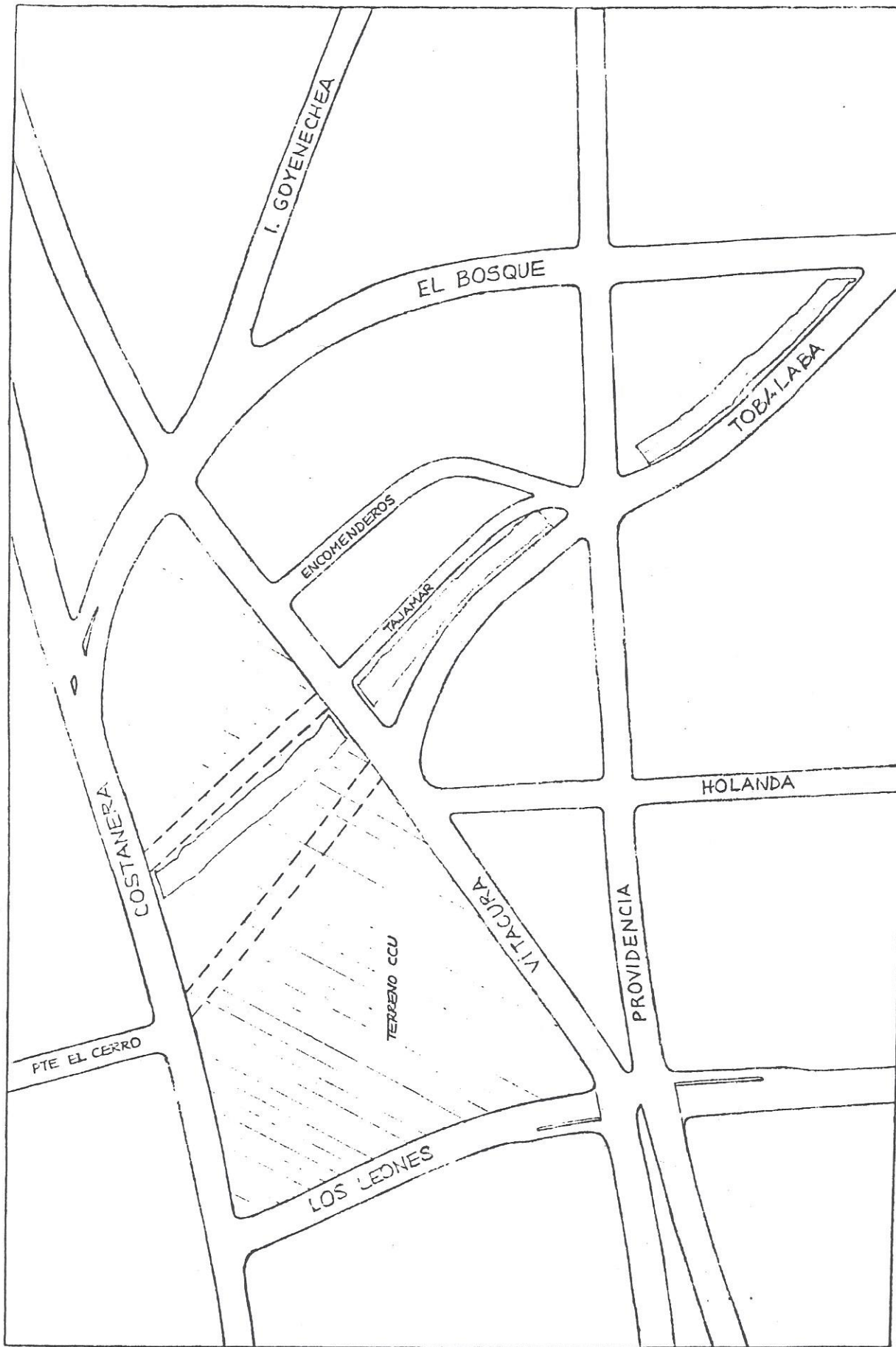


FIGURA 2 : Alternativas de conexión vial a través de los terrenos de la CCU

