

Aplicaciones prácticas de la informática a los proyectos de carreteras (*) (**)

Por SANTIAGO PEREZ-FADON MARTINEZ

Ingeniero de Caminos, C. y P.
Jefe del Dpto. de Carreteras de Euroestudios, S. A.

El artículo se orienta a la divulgación del «state of the art» de las aplicaciones informáticas en los proyectos de carreteras, en una empresa de consultoría.

En la introducción se explican los factores que han influido en el desarrollo de las aplicaciones informáticas en la técnica de carreteras. El texto se ha dividido en cuatro apartados. En el primero se trata la fase de planeamiento, con especial referencia a los estudios de tráfico. En los apartados segundo y tercero las etapas de diseño y producción. En el apartado cuarto algunas aplicaciones en la fase de asistencia técnica durante las obras. Finalmente, se apuntan algunas posibilidades del futuro previsible a medio plazo.

1. INTRODUCCION

De entre las distintas especialidades que se aplican a los proyectos de ingeniería civil, la de carreteras es una de las que han alcanzado mayor desarrollo en los últimos años en las aplicaciones informáticas. Este mayor desarrollo se debe a una serie de características que consideradas en su conjunto hacen los proyectos de carreteras y otras obras lineales idóneas para su informatización.

La primera característica es el concepto de obra lineal que dichas infraestructuras admiten. Así, una carretera puede concebirse como un elemento definido por una sección generatriz (sección transversal tipo, sometida a ciertas leyes de variación) que se desplaza a lo largo de un elemento directriz de carácter lineal (eje longitudinal, que se define por sus proyecciones en planta y alzado).

Dos notas se destacan como consecuencia de esta concepción de los proyectos de carreteras: La primera que la ingeniería de carreteras es en última instancia una aplicación de la ciencia geométrica. La segunda que esta aplicación geométrica,

en cuanto se realiza a intervalos constantes sobre el elemento directriz longitudinal, supone un elevado grado de repetitividad de cálculos geométricos sobre secciones transversales.

Una primera puntualización aparece aquí como necesaria para evitar el riesgo de reducir la actividad del ingeniero de carreteras a la de una pura y simple aplicación geométrica. En este sentido conviene distinguir dos etapas en la elaboración de un proyecto de carreteras. En una primera fase de concepción y diseño, se han de tener en cuenta todas las causas y especialidades que van a determinar las características geométricas de la línea. Así, en esta fase serán relevantes los conocimientos y estudios de: Transporte, tráfico, urbanismo, geotecnia, hidráulica, estructuras, etc. En una segunda fase de producción o determinación geométrica del proyecto, se materializará la definición detallada de la carretera. Así, esta etapa resultará una consecuencia de la problemática considerada en la fase anterior.

Una característica a destacar durante la etapa de concepción y diseño, es el hecho de que algunas de las causas citadas como relevantes para esta fase, requieren de la modelización matemática para su análisis. Los estudios de tráfico son el ejemplo más característico y su informatización ha llegado a ser técnica usual en los proyectos de carreteras.

Se puede resumir, por tanto, que algunas de las características que han propugnado un mayor desarrollo informático de los proyectos de carreteras han sido: La necesidad de modelización matemática de algunas de las causas determinantes del proyecto de una carretera en la etapa de concepción

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 31 de enero de 1981.

(**) Este artículo es un resumen de una conferencia dada en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander, el pasado mes de marzo de 1980, por invitación del profesor adjunto de la Cátedra de Carreteras don Jaime Izquierdo del Fraile. Y debe su publicación a la recomendación que en tal sentido nos hizo el titular de la Cátedra don Carlos Kraemer Heilperno. Colaboró en la preparación de la misma el ingeniero de Caminos de Euroestudios, S. A. don Javier del Valle Pintos. A todos ellos mi agradecimiento.

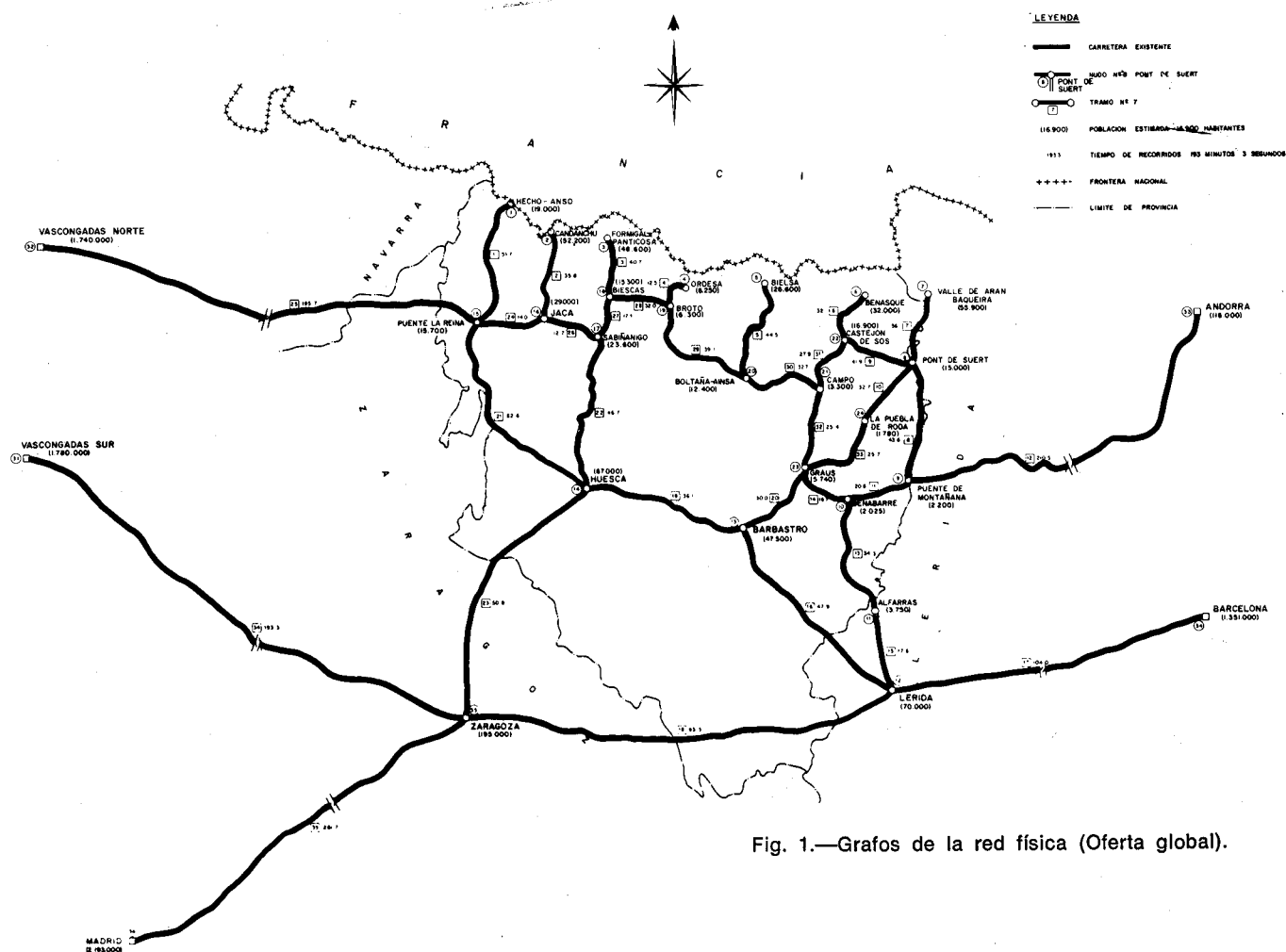


Fig. 1.—Grafos de la red física (Oferta global).

y diseño. Y la concepción de las obras de carreteras como obras lineales susceptibles de una definición geométrica sencilla y repetitiva en la etapa de producción.

En consecuencia con lo anterior, en aquellos tramos en que las obras de carreteras se apartan de este modelo lineal (enlaces e intersecciones) existe una mayor dificultad de informatización. En este sentido se están desarrollando investigaciones y trabajos que abandonan el tratamiento lineal clásico y utilizan bancos de datos gráficos, a base de modelos digitales del terreno y la intersección de esta superficie con la de la futura carretera de una forma global. No obstante, la implantación de estos nuevos sistemas no es aún operativa a nivel de aplicaciones prácticas, por lo que esta exposición se limita a las realizaciones que se han venido desarrollando en los últimos años en una empresa que suponemos representativa del estado de la tecnología informática aplicada a carreteras en España.

2. TRAFICO Y PLANEAMIENTO

Dentro de la etapa de concepción y diseño, es la materia tráfico una de las que más requiere y mejor se adapta a la modelización matemática. En lo que sigue se realiza una descripción concreta del programa principal de tráfico y sus modos de aplicación.

Este programa se podría clasificar dentro del grupo de modelos clásicos denominados de cuatro etapas. Si para fijar ideas se relacionan los conceptos generales con una aplicación concreta del programa de tráfico para resolver los flujos de equilibrio que tendrían lugar en una red arterial urbana o en una red de carreteras interurbana, la etapa de generación determinaría el número total de viajes que se originarían en cada una de las zonas en las que se divide el área en estudio. En la etapa de distribución se obtendrían las zonas de destino de los viajes generados. La etapa denominada reparti-

APLICACIONES DE LA INFORMATICA A PROYECTOS DE CARRETERAS

[illegible]

Fig. 2.—Matriz orígenes-destinos (Demanda global).

ción modal define el modo de transporte en el que se realizarían cada una de los viajes. Finalmente, en la parte de asignación se determina cuáles serían los itinerarios seguidos por cada uno de los viajes y en consecuencia los flujos de transporte que se establecen al alcanzarse el equilibrio.

En términos generales se podrían clasificar las dos primeras etapas (generación y atracción) como la modelización de la demanda. En las dos etapas últimas (repartición modal y asignación), se modeliza la oferta y se resuelve, mediante la asignación, el equilibrio entre oferta y demanda.

Los programas de generación y atracción utilizan en parte algunas de las subrutinas del programa principal de asignación, otro tanto ocurre con el programa de distribución modal, es por ello que se aborda con alguna extensión la explicación del funcionamiento del programa principal de asignación para hacer después una breve referencia a las otras etapas.

El primer paso para la aplicación de este programa de asignación es la definición de un grafo formado por nudos y arcos de comunicación entre ellos (fig. 1). Los nudos podrán ser no generadores receptores de tráfico y se corresponderán con

los centroides de los distritos en que se divida una ciudad en el caso de estudio de una red arterial, o con las poblaciones en el caso de una red interurbana. Los arcos representarán posibilidades reales de comunicación y en el caso más frecuente simularán las calzadas o carreteras existentes. Este grafo o red física se definirá al programa mediante una entrada de datos en la que se especifica para cada tramo el nudo origen, el nudo fin y una serie de características del tramo que hacen referencia a las características funcionales de los mismos identificadas por sus tipos de curvas flujo-velocidad y velocidad-coste. El programa acepta la división de cada tramo en subtramos de características homogéneas.

Por otra parte, existirá una demanda de comunicación entre las distintas zonas que puede representarse mediante una matriz que recoja el número de viajes entre cada dos nudos de la red (fig. 2). Esta matriz se supone obtenida previamente bien mediante un modelo de generación atracción, bien mediante encuestas directas realizadas a los usuarios. Asimismo se supone en lo que sigue, y ello no resta generalidad, que los viajes se realizan mediante un único sistema modal, por ejemplo vehículo privado. Conocida esta matriz origen-destino se

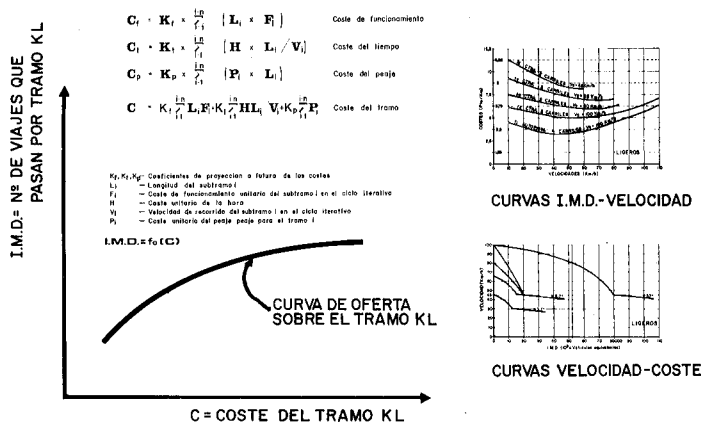


Fig. 3.—Curva de oferta sobre el tramo KL.

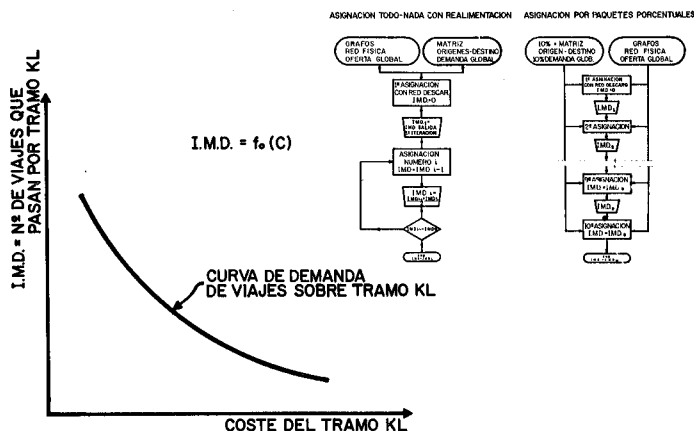


Fig. 4.—Curva de demanda sobre el tramo KL.

introduce como dato al programa mediante una sencilla codificación: nudo I, nudo J, número de viajes.

Se tienen así introducidos en el ordenador los dos conjuntos de datos básicos: De una parte la demanda global de transporte representada por la matriz de viajes con origen-destino en los nudos I, J, y de otra la oferta global, dada por la red de carreteras existentes y representada en el ordenador por el grafo correspondiente.

La demanda y oferta globales de transporte en el área en estudio y el equilibrio entre ambas se obtiene estudiando las demandas y ofertas unitarias sobre cada tramo y agregando el total de tramos. Aislado un determinado tramo de la red se estudia cómo se obtienen las curvas de oferta y demanda sobre él y cómo se establece el equilibrio. Mediante un proceso de agregación posterior que incluya el total de los tramos se resuelve el problema del total del área en estudio.

Sea el tramo KL aquel genérico cuyas curvas de demanda y oferta se estudian. La oferta del número de viajes que admite este tramo KL es una función del coste de recorrido de dicho tramo (fig. 3). Siendo esta función creciente con dicho coste, es decir, a mayor número de vehículos que recorren el tramo menor nivel de servicio y mayor nivel de coste. El programa que se está describiendo materializa el coste de recorrido de cada tramo en el concepto de coste generalizado que se compone de tres sumandos: Los costes del tiempo, los costes de funcionamiento y los costes de peaje cuando existan.

Los costes del tiempo hacen referencia al valor del tiempo empleado por los usuarios en el recorrido del tramo y son función de la velocidad de circulación de vehículos en el subtramo i . Esta velocidad se obtiene de la correspondiente curva flujo-velocidad, de acuerdo con la I.M.D. de iteración que para dicho subtramo se esté adoptando en el proceso iterativo.

Los costes de funcionamiento engloban los costes típicos de tal concepto, como son: Gastos de carburante, aceite, neumáticos, etc. El coste unitario de funcionamiento de los vehículos en el subtramo i es función de la velocidad de circulación. Este coste se obtiene de la correspondiente tabla coste-velocidad, entrando con la velocidad correspondiente a la curva flujo-velocidad característica de dicho subtramo y de acuerdo con la I.M.D. que esté adoptando el correspondiente ciclo del proceso iterativo.

El coste de peaje acepta utilidades conceptuales alternativas al ser una constante que depende solamente de la longitud de los tramos y no del número de viajes que se asignen.

La función de demanda de cada tramo se establece precisamente a través del proceso de asignación. Ahora bien, si existiera un único camino entre cada pareja de nudo I y J a través de la red existente, la resolución del problema no plantearía cuestión alguna y se trataría de una identidad en la que el número de viaje entre I y J se asignaría por este único camino existente. Es por la existencia de caminos alternativos que son necesarios los programas de asignación (fig. 4). Dado el tramo KL ocurrirá que en el límite la demanda potencial máxima será el total de viajes generados en el área. En el otro extremo la demanda sería cero cuando ningún viaje utilizara el citado tramo. En general, el número de viajes demandado sobre este itinerario será decreciente con el coste unitario del viaje. El coste de recorrido del tramo se compara con los costes de uso alternativo de otros itinerarios. Así se configura una ley de demanda de número de viajes sobre cada tramo que es decreciente con el coste de recorrido de cada uno de ellos.

La asignación de viajes a los tramos se realiza mediante el siguiente proceso: Supuesto una I.M.D. en cada tramo del grafo les corresponderá conse-

cuentemente un coste generalizado a cada uno de ellos. Se trata ahora de encontrar para cada relación de viajes con origen en el nudo I y destino en el nudo J, aquel camino o sucesión de arcos del grafo que hace mínima la suma de los costes generalizados de cada uno de ellos. A este camino se le denomina camino crítico. El problema puede resolverse mediante cualquiera de los algoritmos que estudia la teoría matemática de grafos. Establecidos para cada par de nudos I-J el conjunto de caminos críticos la asignación puede resolverse por alguno de los siguientes métodos.

El método de asignación denominado «todo o nada» asigna la totalidad de los viajes con origen en I y destino en J al camino crítico o de coste generalizado mínimo. El método de los caminos múltiples no asigna a los tramos un coste único, sino que utiliza este coste generalizado mínimo como media de una distribución normal y elige después el parámetro coste de cada tramo del grafo mediante la generación de una tabla de números aleatorios. El método de asignación de los «paquetes» consiste en asignar la matriz origen-destino, porcentualmente, por ejemplo, del 10 por 100 en el 10 por 100 de dicha matriz.

El programa que se está describiendo puede utilizar alternativamente el método de asignación «todo o nada» con realimentación o el método de asignación por «paquetes». En el primer caso la coincidencia entre la I.M.D. supuesta para el cálculo del coste de los tramos y la I.M.D. que resulta del proceso de asignación, se logra realizando una serie de ciclos iterativos en cada uno de los cuales se modifica la I.M.D. de partida haciéndola igual a la obtenida en la iteración anterior. El principal inconveniente del método «todo o nada» con realimentación es la falta de convergencia u oscilación del número de viajes asignados a un determinado tramo en el caso de redes urbanas próximas a la saturación. Esto se comprende fácilmente si se tiene en cuenta que en cada iteración uno de los dos itinerarios en competencia está sobrecargado en tanto que en la siguiente iteración el tráfico se irá por el itinerario alternativo que se encuentra prácticamente sin carga.

Para resolver este problema de oscilación se emplea la asignación por «paquetes». Se parte en la primera asignación porcentual de una red descargada, se realimentan las siguientes pasadas del programa con las I.M.D. acumuladas obtenidas en la iteración anterior, y se continúa con el proceso hasta la asignación del último paquete.

Queda así resuelto mediante el proceso de asignación, la función de demanda, es decir, el número de vehículos que pasan por cada tramo en función del coste del mismo, y en particular se resuelve el punto de equilibrio que determinará el número de viajes de cada tramo (fig. 5).

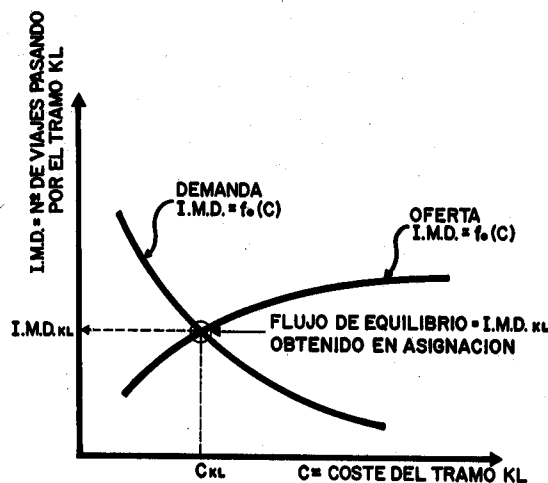


Fig. 5.—Determinación del flujo de equilibrio I.M.D. KL.

Se supuso al principio de esta exposición que se conocía la matriz origen-destino. Esto con frecuencia no es así en la realidad ya que exige la elaboración de encuestas amplias, con dificultades prácticas de ejecución y en cualquier caso muy costosas. Por ello es frecuente la obtención indirecta de la matriz origen-destino exigiéndose entonces procesos de calibrado y ajuste de los modelos que se empleen.

El programa general de tráfico contiene una serie de subprogramas aplicables a la obtención indirecta de matrices origen-destino mediante modelos basados en los clásicos de gravedad que después han evolucionado hacia los denominados modelos de generación- atracción y modelos probabilísticos. Estos modelos obtienen los viajes generados por cada núcleo del grafo como una función empírica de una serie de variables entre las cuales la más relevante es el número de habitantes asignados a dicho núcleo. El destino de estos viajes se determina mediante los coeficientes de atracción proporcionales de los demás nudos. Los coeficientes de atracción que emplea el programa incorporan por una parte los puestos de trabajo, por otra las características de atracción en tiempo libre y finalmente una función de resistividad al desplazamiento entre zonas. Esta función se ha hecho depender precisamente del coste generalizado mínimo entre cada dos nudos, utilizándose esta parte del programa de asignación en los programas de generación-atracción.

Antes de pasar a otro tipo de programas más directamente relacionados con las aplicaciones geométricas, hay que reseñar la utilización de este mismo modelo matemático de asignación, con ligeras modificaciones, para la comparación de alternativas en los niveles de estudio previo y anteproyecto. Para establecer el coste generalizado de una

APLICACIONES DE LA INFORMATICA A PROYECTOS DE CARRETERAS

alternativa habrá que sumar al coste de construcción el coste generalizado de usuario. Este último se obtiene mediante el programa de asignación descrito y a partir de ellos se podrá obtener la tasa de rendimiento interno de cada alternativa.

3. DISEÑO

Se aborda ahora una segunda etapa denominada de diseño, en la que son relevantes los problemas geométricos de la carretera en relación con su función y con los costes de obras resultantes. En esta etapa se utiliza un conjunto integrado de programas (fig. 6), cuyo empleo va a proseguir en la fase posterior de producción del proyecto siendo difícil marcar la frontera entre ambas etapas de diseño y producción. El conjunto de programas que se emplean proviene de cuatro fuentes distintas.

Para los estudios del eje en planta se utilizan algunos programas del conjunto de programas HIDES (Highway Design System), este conjunto de programas pertenece a la librería de I.B.M. Para la optimización de ejes en alzado se emplean parte del conjunto de programas H.O.P.S. (Highway Optimization Program System) redactados por el De-

partment of the Environment Highway Engineering Computer Branch. Para el cálculo de movimiento de tierras se utiliza una parte del conjunto de programas B.I.P.S. (British Integrated Program System) redactados conjuntamente en Inglaterra por los County Highway Department y el Ministry of Transport. Finalmente, para el dibujo de los planos de secciones transversales, alzados longitudinales y planta con explanación, se han elaborado programas propios en el Departamento de Información de la empresa.

El primer programa del conjunto integrado de programas que ha de emplear el ingeniero de carreteras es el programa AXIS de los HIDES. Este programa permite la definición analítica de un eje en planta que ha sido previamente dibujado sobre los oportunos planos cartográficos. Los elementos geométricos elementales que utiliza el programa son: Alineaciones rectas, curvas circulares y clotoides de transición. El objetivo del programa es entregar en su salida los puntos de tangencia entre cada uno de estos elementos.

El programa distingue las alineaciones rectas y circulares como elementos independientes en tanto las clotoides las considera elementos de co-

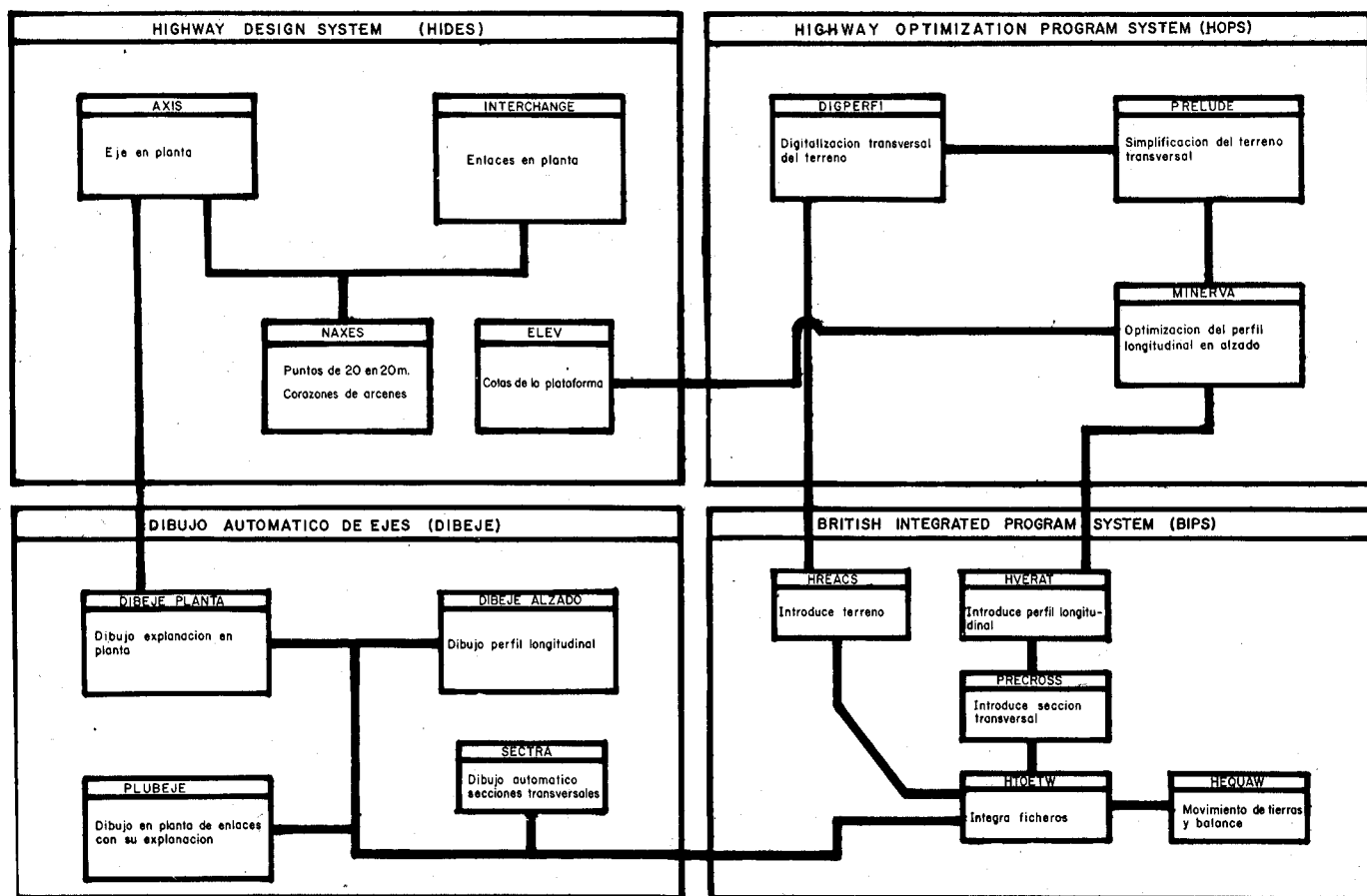


Fig. 6.—Conjunto integrado de programas.

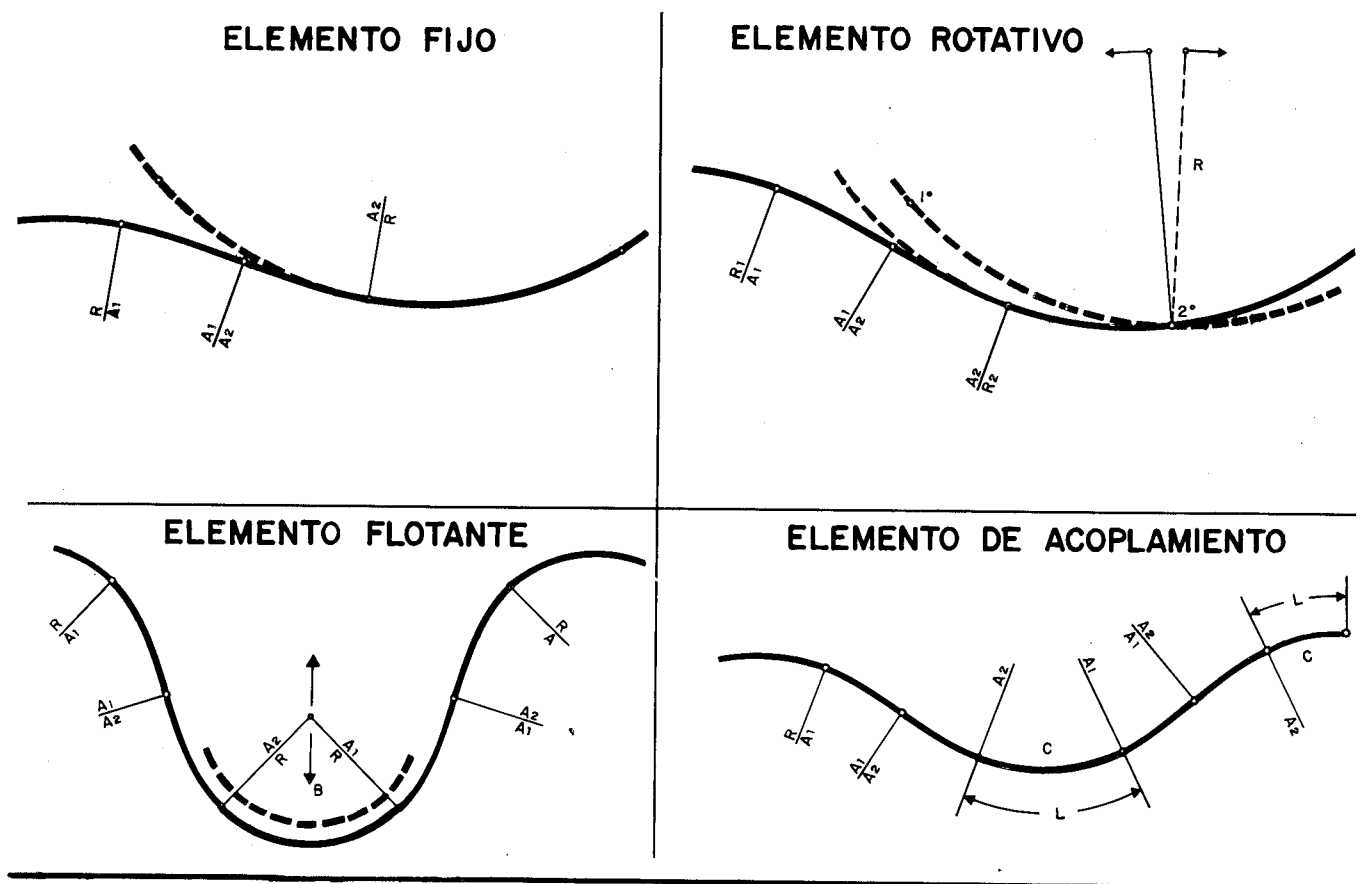


Fig. 7.—Programa AXIS.

nexión ligados a algunos de los anteriores. Para los elementos independientes el programa distingue cuatro categorías que responden bien a los problemas que el ingeniero de trazado se encuentra cuando está implantando un eje gráficamente sobre un plano cartográfico (fig. 7). Estas categorías diferenciadas por códigos de identificación en los datos son:

Elementos fijos: De posición inequívocamente determinada en el plano cartesiano mediante los suficientes datos de entrada. Así cuando se den en los datos las coordenadas de dos de sus puntos, su radio de curvatura y el sentido de la misma.

Elementos rotativos: Pueden girar sobre el segundo de los puntos definidos por coordenadas hasta su posición definitiva de conexión con los elementos inmediatos.

Elementos flotantes: Ninguno de los dos puntos dados por coordenadas permanecerá en general en su situación final, sino que el elemento es trasladado en el plano cartesiano hasta conectar con los elementos inmediatos.

Elementos de acoplamiento: Se sitúan a partir del segundo punto definido para el elemento anterior, se mueven con él si es rotatorio a flotante y su longitud se acopla a las necesidades de conexión con los elementos inmediatos.

Mediante la oportuna combinación, que ha de respetar ciertas reglas de secuencia, se logra la definición analítica del eje en planta de la carretera que se proyecta. El programa entrega en su salida los datos correspondientes a las coordenadas X, Y y Azimut de los puntos de tangencia o principales del trazado. Estos puntos se entregan en soporte papel a través de la impresora y en soporte magnético, habitualmente discos, para su archivo y posterior uso como datos de entrada de otros programas. Un aspecto importante es la comprobación de los posibles errores introducidos durante este proceso. Para ello se dibuja el eje mediante un programa de dibujo en planta. En el dibujo se apreciarán de inmediato los errores que hayan podido cometerse.

Un programa directamente relacionado con el programa AXIS se empleará para los cálculos en

planta de los enlaces. Este programa es el programa INTERCHANGE de los HIDES. El programa es similar en su concepción al AXIS e incorpora además la posibilidad de conectar el eje en planta del ramal que se está definiendo a otros dos ejes previamente definidos, en estaciones predeterminadas o a determinar por programa, según se den los datos de entrada.

El programa resuelve el problema a través de un elemento cuyo concepto es similar al de los elementos de acoplamiento. Este elemento ha de ser específicamente definido por un código en la entrada de datos y es aquel cuya longitud o desarrollo se variará para acoplarse a los dos ejes predeterminados.

El programa NAXES de los HIDES se emplea básicamente para dos finalidades. La primera para obtener las relaciones entre dos ejes como es el caso de la determinación de los corazones de arcones o calzadas en los enlaces de autopista. La segunda para la determinación de las coordenadas

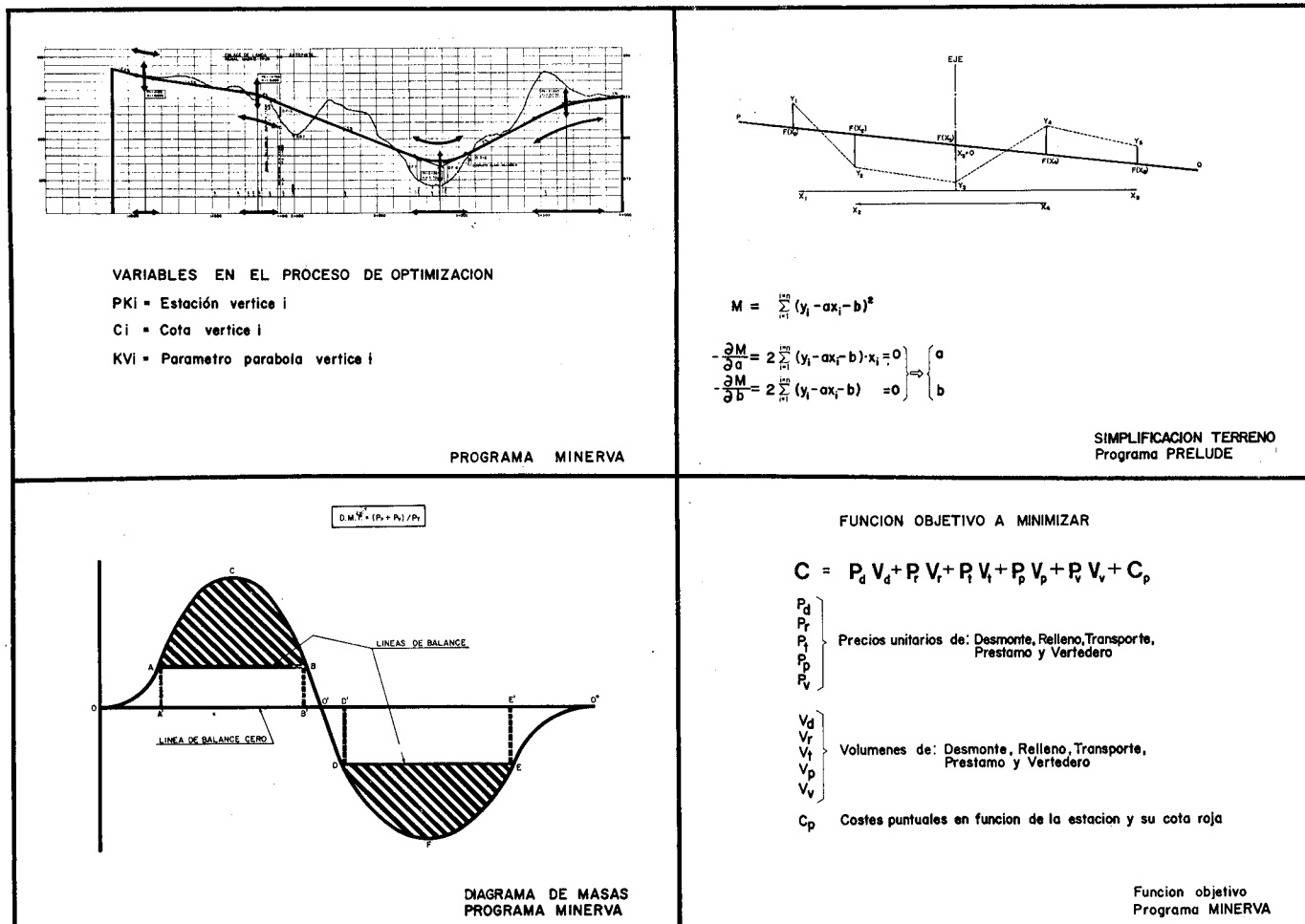
sobre un eje o en puntos transversales al mismo en distancias a intervalos constantes.

Así, mediante el conjunto de los tres programas de los HIDES descritos se resuelven los principales problemas geométricos que habitualmente plantean las definiciones analíticas en planta.

Volviendo al organigrama de la figura 6, se comentará ahora el conjunto de programas H.O.P.S. que van a permitir por una parte la definición del terreno sobre el cual se asienta la carretera y por otra la optimización del movimiento de tierras mediante la variación del eje longitudinal en alzado.

La primera operación que es preciso realizar para la introducción de los datos del terreno en los archivos del ordenador, es la digitalización del mismo. Se emplea el modelo lineal transversal, es decir, se utilizan secciones transversales del terreno en intervalos constantes sobre el eje. La operación de digitalización se realiza mediante un tablero de digitalización. Un tablero de digitalización es similar a un tablero de dibujo en cuyo interior

Figura 8.



incorpora una retícula de hilos electrónicos, conectado a él eléctricamente se puede mover un cursor o lupa que registra información habitualmente en cinta magnética. La digitalización de cada uno de los perfiles transversales consiste en situar el cursor sobre la línea de nivel del plano, pulsar para registrar sus coordenadas y cota, y repetir la operación hasta terminar cada sección transversal. El programa DIGPERFI traduce el formato estándar de la digitalización al formato requerido en la entrada de los programas H.O.P.S.

Siguiendo el flujo del organigrama presentado, el siguiente programa que se emplea es el PRELUDE (fig. 8). Este programa toma como datos de entrada los datos del tramo digitalizado y entrega su salida para entrada del programa MINERVA que será el que propiamente realice la optimización en alzado. El objetivo del programa PRELUDE es simplificar los datos del terreno.

La simplificación que efectúa este programa consiste en sustituir cada sección transversal del terreno por una recta interpolada por el método de mínimos cuadrados. El programa utiliza como sistema de coordenadas un eje de abscisas pasando por el punto de eje en planta y un eje de ordenadas situado en el plano de comparación a cota cero. El programa reduce así el terreno en cada sección transversal a una cota roja y una pendiente transversal. Esta simplificación permitirá, mediante sencillas fórmulas de figuras geométricas, establecer las áreas en desmonte o relleno de cada sección transversal. La simplificación se introduce para reducir el tiempo de proceso, que de otro modo resultaría excesivo durante los numerosos ciclos que se realizarán en el siguiente proceso iterativo.

El programa MINERVA de los H.O.P.S. es un programa de optimización en alzado, es decir, un programa que modifica el perfil longitudinal de una planta dada para lograr que el coste de las obras sea mínimo (fig. 8).

El programa trabaja a partir de un perfil longitudinal inicial que se da como dato y lo ajusta por aproximaciones sucesivas hasta lograr el perfil de coste mínimo. El perfil longitudinal que emplea el programa está formado por alineaciones rectas y parábolas de acuerdo entre ellas.

La función objetivo a minimizar en el proceso de optimización es el coste de tierras más estructuras. Las variables consideradas en el proceso de optimización son la estación de cada vértice, su cota y el parámetro de la parábola de acuerdo.

El programa acepta en su entrada de datos restricciones de libertad de estas variables. Así, por ejemplo: Establecimiento de cotas mínimas por necesidades de drenaje en determinados puntos, niveles o cotas máximas por necesidades de gálibo en pasos bajo estructuras, etc. Asimismo, se acep-

tan restricciones referentes a los parámetros funcionales del longitudinal, tales como pendientes máximas y limitaciones a los parámetros de las parábolas de acuerdo.

El proceso de optimización consiste en realizar incrementos finitos independientes de cada una de las variables y comprobar si la variación producida en la función objetivo es decreciente hacia el mínimo relativo que se busca.

Cada variable se incrementa independientemente y después de cada iteración se calcula el valor de la función objetivo y su diferencia porcentual con el valor obtenido para la misma en la iteración anterior. A través de este valor comparativo se califica la iteración como positiva cuando el decrecimiento de la función objetivo es significativo. Como negativa cuando la función objetivo se incrementa significativamente. Y como neutra cuando la función objetivo no ha cambiado de modo significativo en esta iteración.

En tanto las iteraciones vayan clasificándose como positivas se continúa con el proceso iterativo. Cuando se alcanza una iteración neutra se abandona el proceso iterativo de la variable que se está considerando y se procede a iterar la siguiente variable en la lista. Finalmente, cuando una iteración es clasificada como negativa se reduce la amplitud del incremento en el que había sido modificada la variable que lo ha producido y se repite la iteración. Cuando todas las variables han sido iteradas se dice que el programa ha completado un estado. Al final de cada estado la reducción porcentual de la función objetivo conseguida en el mismo es comparada con el factor de convergencia del estado que ha sido dado como dato. Si la reducción es menor que el valor prefijado en los datos, el programa termina y entrega el perfil longitudinal resultante, en caso contrario se inician las iteraciones del siguiente estado.

La función objetivo que emplea el programa se compone de los seis sumandos de la figura 8.

Los costes de estructuras se introducen en el sumando C_1 en función de la estación y la cota roja.

El programa acepta precios unitarios diferentes para el metro cúbico de excavación en desmonte en distintas zonas y en distintas capas dentro de una misma zona. El precio de relleno es, sin embargo, invariable.

De los seis sumandos relacionados, los cinco primeros dependen del movimiento de tierras y de ellos los volúmenes transportados, préstamos y vertederos dependen además del diagrama de masas, por ello en cada iteración el programa construye el oportuno diagrama de masas y hace hipótesis sobre la compensación longitudinal de tierras (fig. 8).

APLICACIONES DE LA INFORMATICA A PROYECTOS DE CARRETERAS

A fin de establecer una hipótesis de la compensación longitudinal de tierras sobre el diagrama de masas construido en cada iteración, el programa parte del concepto de longitud marginal de transporte. Esta longitud marginal de transporte es aquella longitud en la que el coste de la compensación longitudinal se iguala con la utilización de préstamos y vertederos.

A partir de esta distancia marginal de transporte, el programa construye una hipótesis de compensación longitudinal de tierras. Así, por ejemplo, comenzando por los puntos máximos relativos del diagrama de masas, el programa establece aquellas áreas de diagrama en los que se puede establecer la compensación sin superar la distancia marginal de transporte.

El programa emplea como datos los diferentes precios unitarios citados: un perfil longitudinal, el ancho de la explanación, los taludes de tierra, las limitaciones por puntos críticos, las limitaciones funcionales del longitudinal, las aportaciones puntuales de tierras y los costes puntuales de estructuras. El programa entrega como salida los datos

referentes a las iteraciones que ha realizado y un perfil longitudinal gráfico y analítico.

Se describe a continuación el conjunto de programas procedentes del conjunto BIPS que se emplean básicamente para obtener las cubicaciones del movimiento de tierras. El primer programa de este conjunto hace referencia a la incorporación de los datos del terreno. Es el programa HREACS el que a partir de los datos suministrados por el programa DIGPERFI envía al archivo general en disco los datos del terreno de las secciones transversales de la carretera. Este programa además de generar el archivo del terreno, permite la obtención de una cinta para dibujo en Plotter de dichas secciones transversales, lo que resulta provechoso para utilizarlos como chequeo de los errores cometidos durante la digitalización.

El otro programa de cabecera en el organigrama de los BIPS es el programa HVERAT. El programa toma como datos de entrada los de perfil longitudinal obtenidos mediante el programa de optimización en alzado. A partir de estos datos reproduce analíticamente en impresora el perfil longitudinal,

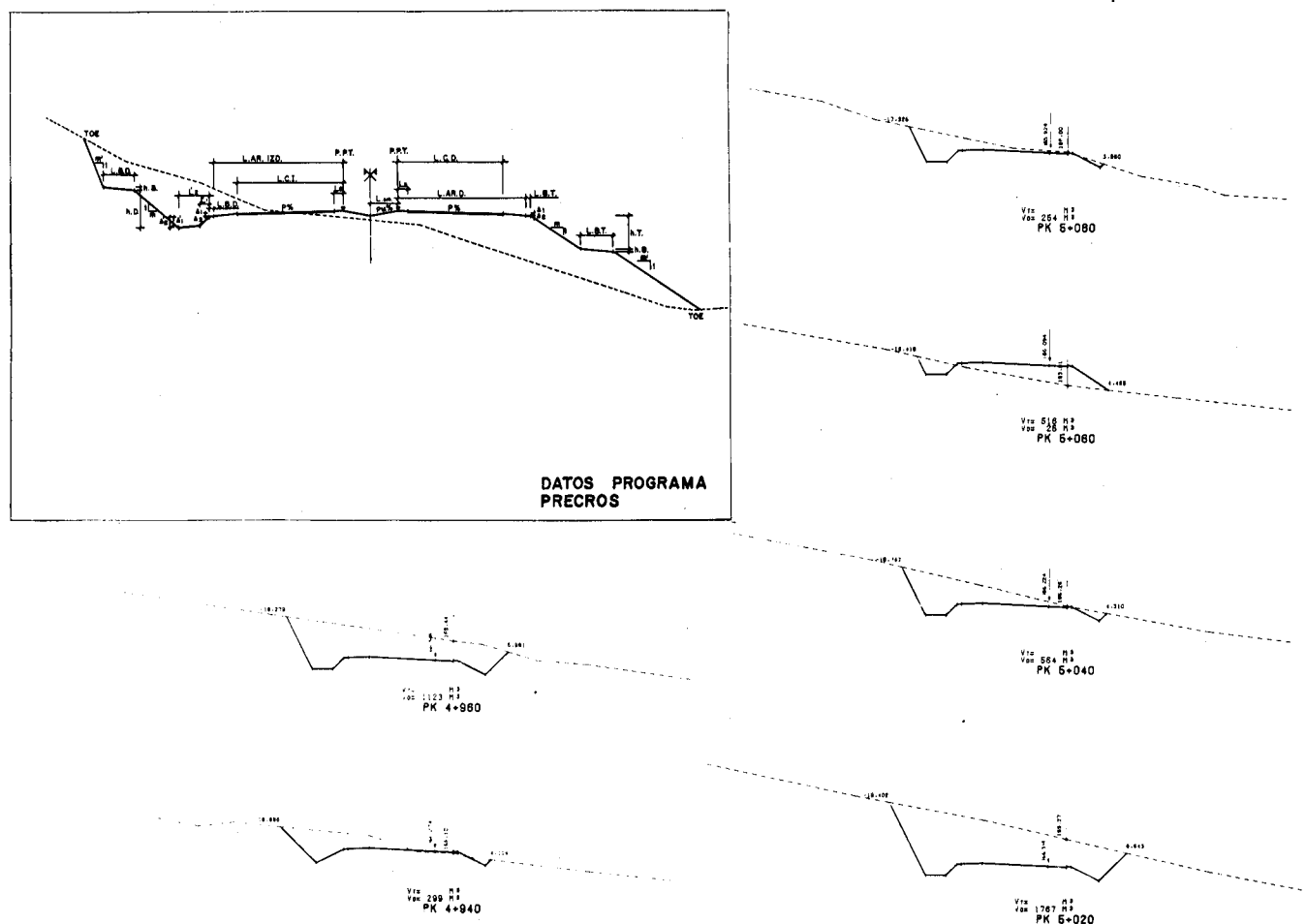


Fig. 9.—Programa SECTRA.

APLICACIONES DE LA INFORMATICA A PROYECTOS DE CARRETERAS

calcula puntos a intervalos constantes o en estaciones específicas y envía todos estos datos a los archivos generales de disco que se están empleando.

El programa PRECROSS (fig. 9) es el que permite la introducción y el archivo en disco de los datos relativos a la sección transversal (peraltes y anchos) de la calzada y arcenes de la carretera.

El programa HTOETW, por una parte, introduce los datos referentes a cunetas, taludes y bermas que ha de llevar la explanación según se encuentre en relleno o en desmante. Por otra parte, realiza la integración de los datos del terreno con los datos relativos a la carretera y a la sección transversal. Los dos últimos programas definen en conjunto las características de las secciones transversales de la carretera y aceptan la variación de dichas características de modo puntual o mediante variaciones lineales o parabólicas, extendidas en determinados intervalos que se refieren por sus estaciones inicial y final.

El programa HTOETW además de integrar los datos de la geometría existente (terreno) y de la geometría futura (perfil longitudinal y características transversales) chequea cuando las semisecciones de cada sección transversal se encuentran en relleno o en desmante y aplica los correspondientes taludes de desmante o terraplén. Con el proceso de este programa se puede decir que termina la etapa de diseño o al menos la introducción de datos al computador y se inicia mediante los programas que se describen a continuación, la etapa de producción de documentos del proyecto.

4. PRODUCCION DE DOCUMENTOS

Se incluyen en este apartado la descripción de aquellos programas que producen ya documentos que servirán para su inclusión en la edición definitiva del proyecto de carreteras.

El primer documento que suele obtenerse en esta etapa de producción son los listados corres-

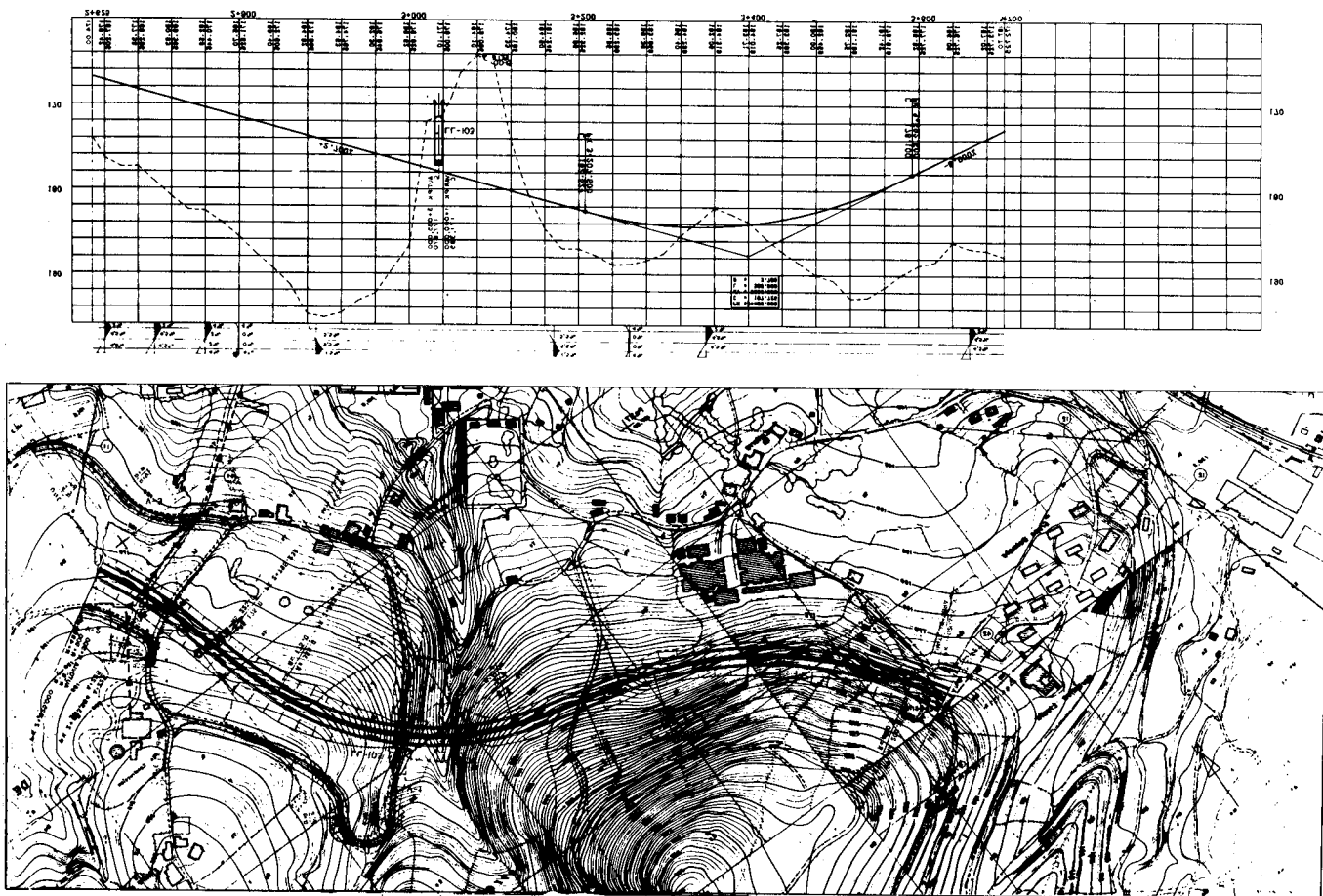


Fig. 10.—Planos de planta y alzado.

pondientes a las cubriciones del movimiento de tierras y balance longitudinal de las mismas que se recogerá después en el diagrama de masas. Estos listados se obtienen mediante el programa HEQUAW cuyos datos de entrada son precisamente los archivos de discos generados por los programas anteriores. El programa acepta la introducción de dos capas distintas de terreno, utilizándose la primera en general para la cubrición de la tierra vegetal y la segunda para excavación sin clasificar. También se pueden introducir en programa coeficientes de esponjamiento, para las diferentes zonas de la carretera. El programa entrega por una parte los volúmenes de excavación en tierra vegetal, y por otra los volúmenes de desmonte sin clasificar y rellenos. Asimismo, calcula los volúmenes transformados teniendo en cuenta los coeficientes de esponjamiento y los balances resultantes en la compensación longitudinal de tierras. El programa realiza las cubriciones mediante el cálculo de las áreas en desmonte o relleno de cada sección transversal.

El programa genera una cinta para Plotter mediante el cual se dibujan las secciones transversa-

les de la carretera incluyendo el terreno natural, las secciones transversales de calzadas y arcenes, las cunetas, los taludes, y las bermas en su caso. El programa rotula además sobre los planos una serie de datos referentes a: Estación del transversal, su volumen de desmonte y terraplén, cota absoluta del terreno y del perfil longitudinal en el eje, y distancia desde los bordes de la explanación al eje en planta de la carretera. Una subrutina especial del programa distribuye los dibujos a la escala que se le indique y en el formato de planos que se elija.

Los programas DIBEJE permiten el dibujo automático en base a los datos generados por los programas anteriores de planos de planta y perfil longitudinal de la carretera (fig. 10). Los planos de planta incorporan todos los datos geométricos del eje que se sintetizan en banderolas asignadas a los puntos de tangencia. Asimismo, se dibujan los bordes de calzadas y arcenes y los extremos de la explanación, indicándose mediante simbología diferente cuando dicha explanación está en desmonte, y cuando en terraplén. El programa estaciona además el eje en planta rotulando el valor de las estaciones en intervalos constantes.

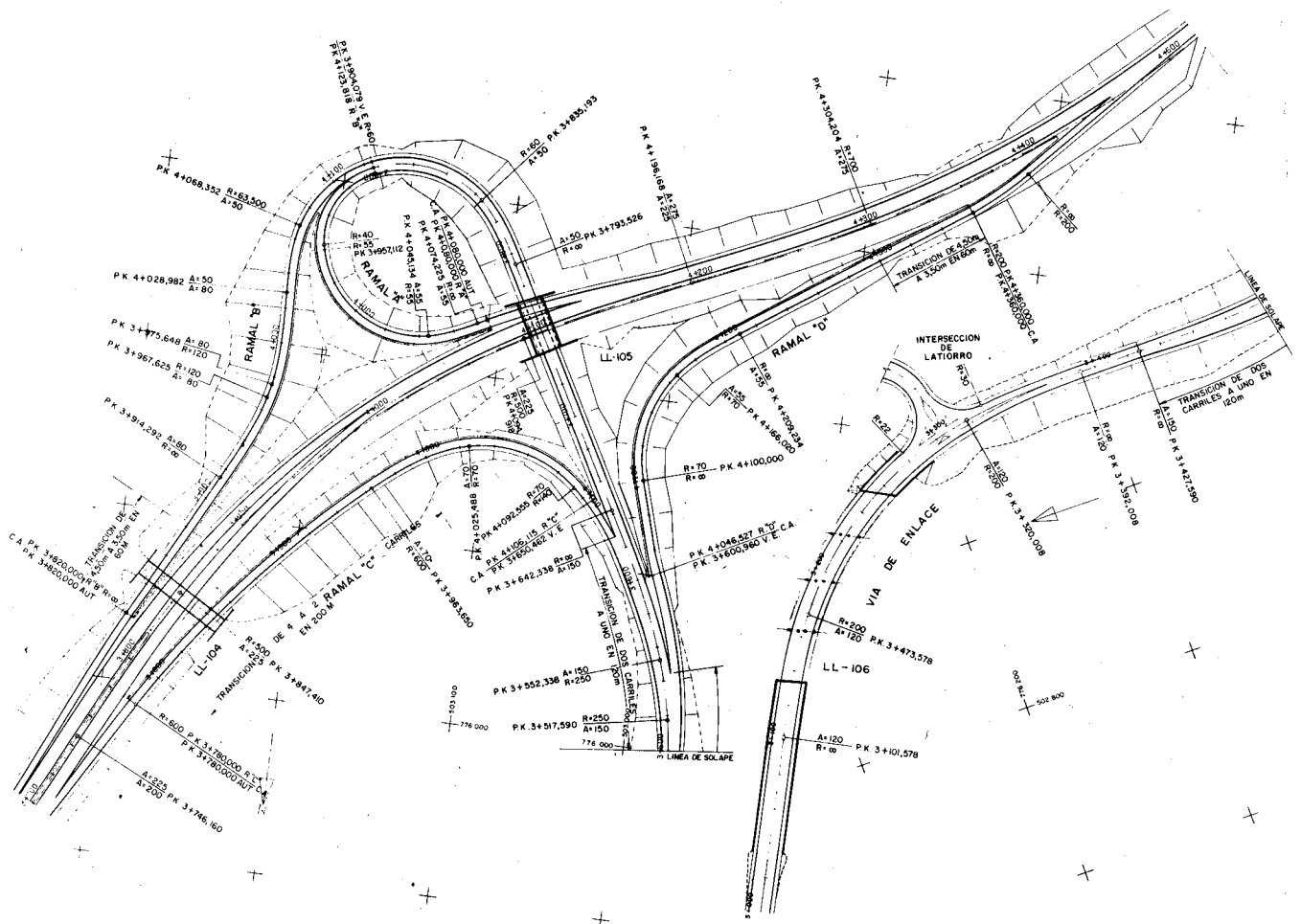


Fig. 11.—Planta de enlaces.

APLICACIONES DE LA INFORMATICA A PROYECTOS DE CARRETERAS

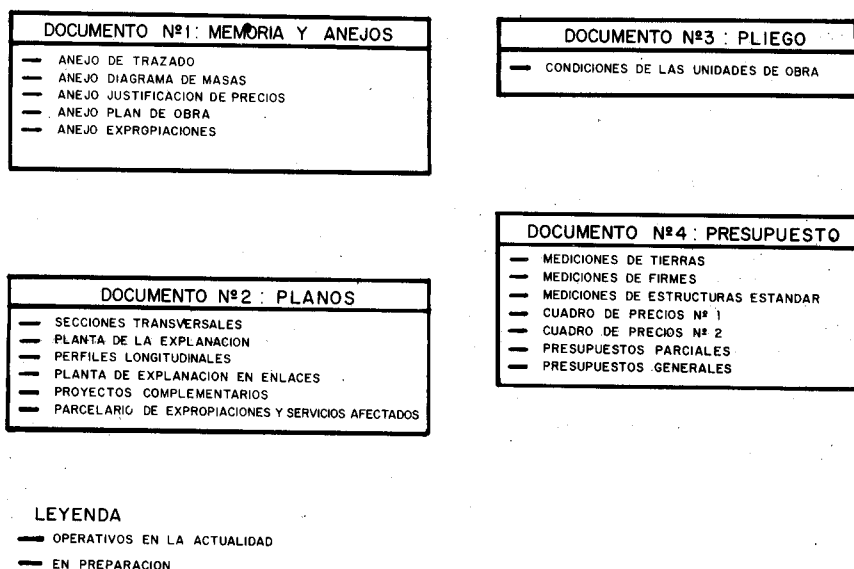


Fig. 12.—Resumen de las aplicaciones informáticas a los proyectos de carreteras.

El sistema tradicional de presentación de los planos de carreteras incluye en la mitad superior de un DIN-A-1 la planta de la explanación y en la inferior el perfil longitudinal de la carretera. El programa DIBEJE siguiendo este sistema de representación dibuja en la mitad inferior del plano: Un perfil longitudinal del terreno, la rasante de la carretera, y rotula en banderolas asignadas a cada vértice entre rasantes, las características analíticas de este vértice. El programa realiza además la cuadrícula de referencia y rotula al pie de la misma el estacionamiento de la carretera, y las cotas del terreno del eje a intervalos constantes.

El conjunto de programas DIBEJE se termina con el dibujo del recuadro del plano, rotulando al pie del mismo: La denominación del proyecto, grupo de planos al que pertenece, denominación específica del plano, fecha de realización, etc.

Una última aplicación que se ha realizado recientemente, es el dibujo de enlaces en planta mediante el programa PLUBEJE (fig. 11). Como se decía al principio de la exposición, en los enlaces, al perderse el carácter lineal del proyecto, se complica notablemente la informatización del mismo. El dibujo de enlaces se realiza por ello recurriendo a la superposición de una serie de elementos lineales que se dibujan sucesivamente sobre el mismo plano. Para ello ha sido necesario realizar pequeñas modificaciones en el programa DIBEJE consistentes fundamentalmente en dejar opcional la distribución del dibujo en el plano DIN-A-1 que se va a usar y modificar las subrutinas de evitamiento de superposición de banderolas.

A partir de los programas de dibujo automático en planta y alzado existen actualmente en elaboración una serie de programas que permitirán en un futuro inmediato el dibujo automático de los planos correspondientes a señalización horizontal, balizamiento, servicios afectados y expropiaciones.

Hay que señalar que se utilizan además en la producción de los proyectos de carreteras, una serie de programas cuya descripción no se incluye en el presente artículo por que no son específicos de esta especialidad, tales como programas de presupuestos, plan de obra, manejo de textos, etc.

Si para terminar con esta fase de producción del proyecto se hace un resumen de los documentos que se obtienen por procedimientos informáticos en los proyectos de carreteras se tiene el esquema de la figura 12.

5. ASISTENCIA TECNICA DURANTE LAS OBRAS

Con ser grande el nivel de información logrado hasta la etapa de producción del proyecto, no termina aquí el uso de la informática en la técnica de carreteras, sino que éste se extiende a la fase de asistencia técnica durante la ejecución de las obras de la que como muestra se comentan brevemente tres programas usualmente empleados.

En primer lugar se realiza en esta fase los denominados proyectos de replanteo consistentes en la determinación en gabinete de los datos que va a emplear el topógrafo durante el replanteo en

campo. En líneas generales el proceso consiste en introducir al computador de una parte los datos de las coordenadas X, Y y Z de las bases de replanteo que van a emplearse y que han sido previamente puestas en el terreno para comprobar que desde ellas es visible el eje que ha de implantarse. De otra parte se introduce los datos analíticos de la geometría futura, es decir, estado de alineaciones en planta y alzado del eje de la carretera. El programa determina los datos necesarios para replantear el eje por bisección, polares, o cualquier otro método de los usados habitualmente en topografía.

Otro programa habitualmente usado en esta fase es el programa ELEV que permite el cálculo de las cotas de las distintas capas del pavimento a diferentes distancias del eje en planta. Estos listados de cotas se utilizan actualmente para establecer los niveles de los alambres palpadores que utilizan las modernas extendedoras de pavimentos y que permiten un perfecto acabado de la nivelación de la rodadura de la carretera.

Por último, el tercer programa a que se hace referencia es el que permite el seguimiento del movimiento de tierras ejecutado periódicamente durante la obra. Este es el programa PERSAF que mediante la toma de la cota en el centro de la explanación la distancia de los bordes de la misma a dicho centro y su cota, calcula: El volumen de tierras ejecutado durante el período (por ejemplo, un mes), el volumen acumulado al origen de las obras, las posibles desviaciones con los volúmenes pre-

vistos en proyecto, y dibuja las secciones transversales de la obra realizada superpuesta con las secciones transversales teóricas a las que ha de llegarse.

6. CONCLUSION

Con la exposición realizada hasta aquí se ha pretendido dar una visión general de la situación actual de la utilización de la informática en los proyectos de carreteras. Cabe señalar como conclusión que lo que se apunta en un futuro próximo es la mayor concatenación e interactividad de todos estos programas, disminuyendo la rigidez del aprovechamiento de los input-output de unos programas para otros. Por otra parte y a medio plazo parece que el camino de las aplicaciones informáticas a las carreteras estará en la utilización de los bancos de datos gráficos actualmente a nivel de prototipos de «hardware» por parte de las grandes casas de ordenadores. Estos métodos se implantarán mediante la interactividad de una unidad central con terminales clásicas tipo impresora y terminales gráficos tales como pantallas gráficas y digitalizadores on line. Hay que señalar, sin embargo, que estos sofisticados sistemas no sustituirán la labor creadora del ingeniero de carreteras en el proyecto de los mismos, y que dentro del futuro previsible se prevén tan sólo instrumentos cada vez más potentes y precisos puestos precisamente al servicio de esta labor creadora.