

LOS CALCULADORES ELECTRONICOS EN LAS OFICINAS DE PROYECTOS

Por Alberto BENITEZ

Ingeniero de Caminos,

El presente artículo expone un ejemplo de aplicación de las técnicas de empleo de calculadores electrónicos a problemas de ingeniería civil. Este programa, entre otros, fué desarrollado por el autor para una empresa de ingenieros consultores de Chicago.

1. Calculadores electrónicos en la Ingeniería Civil.

Los calculadores electrónicos dígitos van extendiendo cada vez más su campo de aplicación a problemas de ingeniería. El uso de "cerebros electrónicos", que hace sólo unos pocos años se asociaba, en Estados Unidos, con abstrusos proyectos supersecreto en el campo de la física nuclear o de los proyectiles dirigidos, ha pasado rápidamente a ser, en una oficina de proyectos, tan pedestre como el de una máquina de escribir o de sacar copias.

Las ventajas económicas del empleo de calculadores electrónicos en los problemas de cada día son en verdad tan evidentes, que incluso pequeñas empresas de proyectos están "electronificándose" cada vez más rápidamente. Un autor americano afirma que, en una oficina en donde haya más de 20 técnicos haciendo cálculos, es económicamente conveniente el disponer de un calculador de tamaño pequeño o mediano. Todos aquellos problemas de cálculo, incluso muy elementales, que se repiten con una frecuencia razonable, son susceptibles de ser programados, de una vez para todas, y resueltos por el calculador de una forma enormemente rápida, eficaz y económica.

Refiriéndonos a problemas elementales de uso ordinario en la práctica de ingeniería civil, tales como cálculos topográficos, resolución de triángulos, aplicaciones del método de Cross, problemas hidráulicos, raíces de ecuaciones de grado elevado, enlaces de curvas en proyecto de carreteras, espirales de transición, cálculo de movimientos de tierras, etc., etc., la preparación del programa, es decir, la serie de instrucciones adaptadas a la "mentalidad" de la máquina puede ocupar a un ingeniero entrenado unos pocos días de trabajo. El programa entonces, generalmente, se reproduce en fichas o en cintas perforadas o en cinta magnética, y está siempre dispuesto para su uso.

En problemas de los tipos citados y en casos de complejidad normal, el tiempo real de ocupación de

la máquina para resolver un caso particular, incluyendo entrada del programa en la memoria electrónica, entrada de los datos, operaciones y salida de los resultados, puede variar de una fracción de minuto hasta media o una hora.

Aunque los costes de utilización de la máquina son relativamente elevados — de 30 a 80 dólares por hora —, para máquinas comerciales de tipo medio, tales como la IBM-650 o la Bendix G-15, su rendimiento es tan alto que las ventajas económicas, en comparación con el trabajo a "mano" (con calculadoras de mesa, o incluso con la clásica regla de cálculo) se hacen bien pronto evidentes. El programa puede llevar incluidos subprogramas de comprobación, que hacen innecesario todo el tiempo normalmente empleado en comprobación por varios operadores independientes. Como regla de andar por casa — y para retribución del trabajo tipo made in USA — se considera que cualquier problema que ocupe a un ingeniero más de cuatro horas de trabajo de cálculo y que se repita con una frecuencia razonable, merece preparar el correspondiente programa.

2. El ingeniero y la calculadora electrónica.

Von Neumann (1) nos dice que nuestro cerebro es fundamentalmente dígito, y, por tanto, idéntico, en principio, a un calculador electrónico de este tipo. Existen, es verdad, algunas diferencias formales.

El sistema de numeración binario, engorroso para usos generales, parece ser el más adecuado, tanto para los calculadores como para las neuronas de nuestro sistema nervioso. Usando sólo dos dígitos, 0 y 1, se presta a representar números por los dos estados — de ser o no ser —. Una cinta puede tener o no te-

(1) The Computer and The Brain, Yale University Press, 1958.

ner una perforación en un lugar determinado, una célula del tambor magnético del calculador puede estar o no estar magnetizada, una neurona de nuestro cerebro puede transmitir o no su impulso eléctrico.

En la jerga de los calculadores electrónicos, esta elección entre los dos estados posibles se llama "bit" (binary digit).

Nuestro cerebro suele tener mucha más memoria que un calculador, incluso de los grandes. Se estima que un cerebro adulto normal puede almacenar 3×10^{20} bits contra unos 10^6 en un calculador grande. El cerebro ocupa menos espacio, es más fácil de transportar, es más barato y su funcionamiento es más económico, gasta como 10^8 menos energía que un calculador.

Por otra parte, nuestro cerebro es más lento que la máquina —unas 10^4 ó 10^5 veces más, lento—. Además se cansa, se distrae y se equivoca.

A pesar de las deficiencias de nuestro cerebro, cuando empezamos a usar calculadores nos damos cuenta de que tiene, por lo menos, una gran ventaja para nosotros: estamos más acostumbrados a usarlo.

El "pensar" en la mentalidad de la máquina requiere un proceso de adaptación un tanto penoso y al mismo tiempo fascinante.

Nuestro cerebro tiene una multitud de pequeños subprogramas, ya prefabricados en la escuela o en la práctica, tales como la raíz cuadrada de 64, o el seno del ángulo doble, o el sentido de la tensión en una viga, que, realmente, simplifican mucho, inconscientemente, el proceso de resolución de un problema más complejo. Después de haber apretado el botón "Limpiar Memoria", podemos estar seguros de que la pobre máquina, a excepción quizá de las cuatro reglas, no sabe absolutamente nada. Tenemos que empezar con ella desde primaria.

Si vamos a usar cosenos, o raíces cuadradas o logaritmos tenemos que alimentarle los correspondientes subprogramas o subrutinas para enseñarle a hallarlos.

Al empezar a trabajar con un calculador electrónico, el ingeniero se siente impresionado por dos características de la máquina: su fabulosa velocidad de cálculo y su estupidez integral. La máquina entiende y aprecia poco soluciones elegantes o ingeniosas que simplifiquen el cálculo, es machacona y rutinaria. Prefiere resolver ecuaciones por métodos pedestres y faltos de imaginación, tales como ir sustituyendo valores hasta acertar o aplicar métodos burdos de aproximación. Por otra parte, es estúpidamente severa y rígida. No perdona el más ínfimo error en los datos o en las instrucciones. Errores que cualquiera pasaría por alto la hacen pararse y tocar un airado timbre de alarma o proseguir estúpidos, absurdos cálculos *ad infinitum*.

En lo que sigue exponemos esquemática y sucintamente, sin entrar en detalles de codificación (tra-

ducción del lenguaje matemático al lenguaje de la máquina) o detalles de manejo de la misma, la resolución de un típico problema en ingeniería hidráulica. Este programa fué escrito por el autor en lenguaje Intercom-1 000, para un calculador Bendix G-15, para una gran empresa de ingenieros consultores en Chicago, fué convenientemente "limpiado de parásitos" o errores (de-bugged) y funciona satisfactoriamente desde mayo de 1959.

3. Flujo en canales de sección complicada.

Los requisitos modernos en el proyecto de autopistas —grandes anchuras, curvas de enormes radios, pequeños cambios de rasante, pendientes muy reducidas— y el creciente desprecio por metro cúbico de tierra movida llevan consigo problemas de drenaje de importancia creciente.

En terreno un poco movido es hoy frecuentemente necesario el meter una autopista por una vaguada haciendo desaparecer ésta por completo. Los problemas de recanalización de la corriente, dimensionamiento de las hipertrofiadas cunetas para distintas condiciones de caudal, estudios de avenidas, estructuras auxiliares, tales como grandes atajeas e incluso disipadores de energía, son cada vez de mayor importancia en el proyecto de la obra.

Conforme aumenta el máximo caudal que ha de evacuar una cuneta y por consiguiente el tamaño de ésta, mayor importancia funcional y económica adquiere el estudio de su óptima sección transversal.

Las condiciones determinantes de las formas óptimas de cunetas son:

a) Caudales de cálculo, generalmente sólo mínimo y máximo.

b) Velocidades admisibles para estos caudales en función de las condiciones de erosión del terreno.

c) Como consecuencia de a) y b), radios hidráulicos necesarios para, en función de la pendiente longitudinal, mantener las velocidades dentro de límites razonables.

d) Provisión de espacio necesario para el empleo de bulldozers, niveladoras, etc., en la construcción de las cunetas y del propio camino.

e) Empleo de máquinas en la conservación de las cunetas: niveladoras para limpieza, máquinas de segar la hierba, de sembrarla, de distribuir fertilizantes, etc.

f) Pendientes transversales adecuadas a la estabilidad de desmontes y terraplenes.

Como consecuencia de estas condiciones, surgen las secciones esquemáticamente indicadas en la figura 1.ª, tomadas de un reciente proyecto de autopista en Peoria, Illinois.

El cálculo hidráulico de canales de estos tipos, que teóricamente no envuelve dificultad alguna y se li-

mita a la aplicación de las fórmulas de Bazin, Manning u otras análogas, es en la práctica bastante tedioso y lleva consigo un proceso de tanteos sucesivos, o de representar las curvas características de la sección.

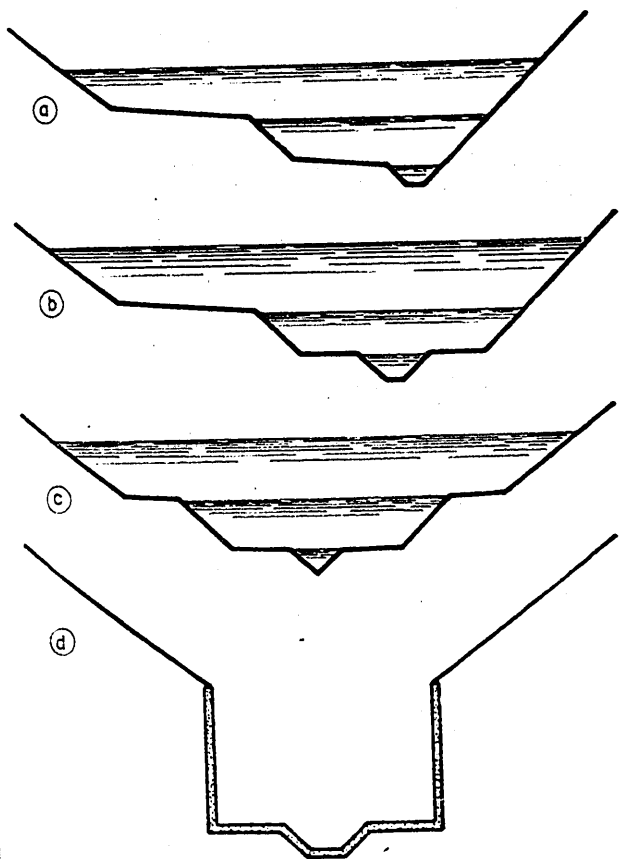


Figura 1.ª.

Cuando las formas, caudales y pendientes varían frecuentemente a lo largo de un tramo de carretera, la cantidad de trabajo de cálculo puede ser muy considerable.

Aplicando la fórmula de Manning, por ejemplo, tenemos:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} s^{1/2},$$

o de otra forma:

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} s^{1/2},$$

en la cual:

Q = caudal.

n = coeficiente de rugosidad de MANNING.

s = pendiente longitudinal.

A = área de la sección mojada.

R = radio hidráulico.

v = velocidad media.

Ahora bien, A y R son funciones relativamente complicadas y discontinuas de la profundidad de cálculo d , y la resolución de la ecuación es d :

$$Q = \frac{A(d)}{n} [R(d)]^{2/3} s^{1/2};$$

no es nada cómoda, incluso por métodos gráficos, si la sección es algo compleja.

Supongamos una sección transversal poligonal con un máximo de diez lados, tal como la representada en la figura 2.ª.

Una razón para tomar diez lados es poder adaptar tal sección al cauce natural de un río para aplicar este programa como parte de otros programas, escritos posteriormente, que resolvían problemas de cálculo de avenidas y de determinación de curvas de remanso en corrientes naturales de agua.

El número máximo de lados, desde el punto más bajo es 5. La sección está definida por las pendientes de los lados: ri a la derecha y li a la izquierda (siempre positivas), y las proyecciones horizontales de los mismos: xri a la derecha y xli a la izquierda (siempre positivas). Si cualquiera de las dos semisecciones tiene menos de 5 lados, éstos se empiezan a numerar desde el lado más alejado, con subíndice 5 hacia el punto más bajo. El lado número 5, a la derecha e izquierda, se considera indefinido. Si un lado ri es horizontal su pendiente se considera $ri = 0,1 \times 10^{-10}$ en vez de cero, con objeto de poder dar generalidad a las fórmulas sin que el calculador se pare al encontrar una división por cero. Si un lado es vertical y su longitud es yri , por ejemplo, hacemos su pendiente $ri = 0,1 \times 10^{10}$ y su proyección horizontal:

$$xri = \frac{yri}{0,1 \times 10^{10}},$$

por razón similar a la antedicha.

Si proyectamos horizontalmente los vértices sobre una vertical que pase por el origen (punto más bajo), llamemos dri y dli las distancias del origen a tales proyecciones (ver fig. 2.ª).

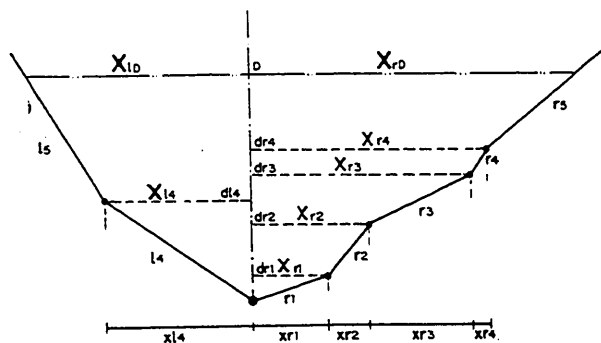


Figura 2.ª.

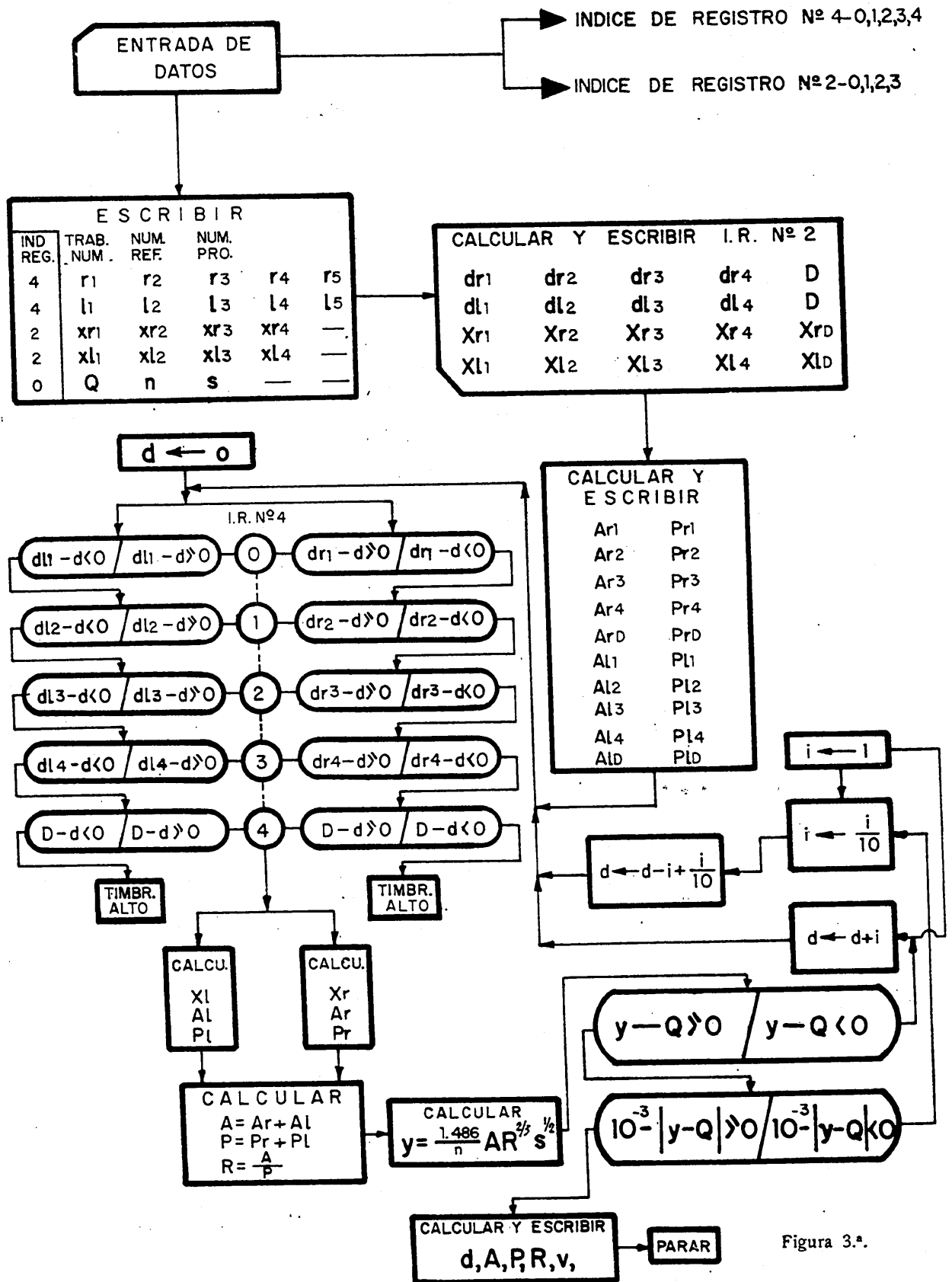


Figura 3.ª.

Sea D una profundidad mayor que cualquiera de las posibles en el problema. Por definición:

$$D > d r_1 \geq d r_3 \geq d r_2 \geq d r_1 \geq 0;$$

$$D > d l_1 \geq d l_3 \geq d l_2 \geq d l_1 \geq 0,$$

Las profundidades "fijas" $d r_i$ y $d l_i$ se obtienen de:

$$d r_1 = r_1 \cdot x r_1;$$

$$d r_2 = r_2 \cdot x r_2 + d r_1;$$

$$d r_3 = r_3 \cdot x r_3 + d r_2;$$

$$d r_4 = r_4 \cdot x r_4 + d r_3;$$

y análogas para el lado izquierdo.

Las abscisas "fijas" a cada lado son:

$$X r_1 = x r_1;$$

$$X r_2 = x r_1 + x r_2 = x r_2 + X r_1;$$

$$X r_3 = x r_3 + X r_2;$$

$$X r_4 = x r_4 + X r_3;$$

$$X r_D = \frac{D - d r_4}{r_s} + X r_4,$$

y análogas para el lado izquierdo.

Las áreas transversales parciales "fijas" son:

$$(A r_0 = X r_0 = d r_0 = 0);$$

$$A r_1 = A r_0 + \frac{X r_0 + X r_1}{2} (d r_1 - d r_0);$$

$$A r_2 = A r_1 + \frac{X r_1 + X r_2}{2} (d r_2 - d r_1);$$

$$A r_3 = A r_2 + \frac{X r_2 + X r_3}{2} (d r_3 - d r_2);$$

$$A r_4 = A r_3 + \frac{X r_3 + X r_4}{2} (d r_4 - d r_3);$$

$$A r_D = A r_4 + \frac{X r_4 + X r_D}{2} (D - d r_4);$$

y análogamente para el lado izquierdo.

Los perímetros mojados "fijos" son:

$$P r_0 = 0;$$

$$P r_1 = \sqrt{(X r_1 - X r_0)^2 + (d r_1 - d r_0)^2} + P r_0;$$

$$P r_2 = \sqrt{(X r_2 - X r_1)^2 + (d r_2 - d r_1)^2} + P r_1;$$

$$P r_3 = \sqrt{(X r_3 - X r_2)^2 + (d r_3 - d r_2)^2} + P r_2;$$

$$P r_4 = \sqrt{(X r_4 - X r_3)^2 + (d r_4 - d r_3)^2} + P r_3;$$

$$P r_D = \sqrt{(X r_D - X r_4)^2 + (D - d r_4)^2} + P r_4;$$

El programa opera de la siguiente forma: un valor arbitrario de la profundidad d (inicialmente $d = 0$) se compara con las distintas profundidades fijas ya calculadas. Supongamos que el valor de tanteo d está entre dos profundidades fijas d_k y d_{k+1} (a uno u otro lado), es decir, que $d_k < d < d_{k+1}$, entonces la máquina calcula:

1. La anchura de superficie de líquido a ambos lados; a la derecha será:

$$X r = X r_k + \frac{d - d r_k}{r_{k+1}}.$$

2. El área de la sección a ambos lados; a la derecha será:

$$A r = A r_k + \frac{X r + X r_k}{2} (d - d r_k);$$

3. El perímetro mojado a ambos lados; a la derecha será:

$$P r = P r_k + \sqrt{(X r - X r_k)^2 + (d - d r_k)^2}.$$

4. El área y perímetros mojados totales:

$$A = A r + A l;$$

$$P = P r + P l.$$

5. El radio hidráulico $R = \frac{A}{P}$.

6. El valor de tanteo d introducido en la fórmula de Manning nos da:

$$Y = \frac{1,486}{n} A R^{2/3} S^{1/2}.$$

7. Si la diferencia entre el caudal dado Q y el valor de tanteo Y es mayor de 0,001 pies cúbicos/segundo, se modifica el valor de d y se repite el ciclo.

8. Para la solución con el error indicado, la máquina escribe los valores finales de d , A , P , R , y la velocidad media $v = Q/A$.

La figura 3.^a muestra el organigrama del proceso lógico del programa.

La máquina Bendix G-15 tarda un máximo de seis minutos en la resolución del caso más complicado en el que se ha usado este programa.