# Tema 4 Las máquinas de Charles Babbage

## 4.1. La vida de Charles Babbage (1791 - 1871)

Se considera a Charles Babbage el abuelo de la era de la computación. El nivel de tecnología que dispuso era, para lo que hoy es posible, lo bastante pobre como para limitar esta relación, pero sus ideas fueron tan avanzadas para su época que encajan mejor en los trabajos realizados 150 años después entre 1930 y 1940 por personajes tales como Zuse o Aiken .

Se sabe que Babbage era una persona rica en su época que heredó una fortuna de más de 100000 libras de su padre y gracias a ello pudo llevar una vida dedicada al estudio y la investigación sin preocuparse de cómo ganarse la vida. Debido a esta libertad su vida científica fue extraordinariamente productiva. Conocido por sus trabajos en la computación, fue un excelente matemático, astrónomo, estadístico, y publicó ocasionalmente trabajos sobre óptica, electricidad, magnetismo, operaciones de compañías de seguros, criptología, geología, mecánica, tasaciones, etc. Publicó varios libros, entre ellos uno considerado como pionero en el campo de lo que hoy en día conocemos como investigación operativa. Fue nombrado profesor honorario en Cambridge, aunque nunca dio clase.

En 1826 Babbage publicó su propia tabla de logaritmos, que fue considerada la más exacta publicada hasta la fecha. No contento con ello, experimentó con combinaciones de colores de papel y tinta para facilitar la lectura. El problema de producir tablas exactas libres de errores fue lo que le condujo a la idea de las máquinas de calcular.

## 4.2. La necesidad de exactitud

El final del siglo XVIII vio la publicación de una gran cantidad de tablas matemáticas, desde tablas de sumar o restar a tablas trigonométricas o de logaritmos de 20 dígitos. En la producción de las tablas se encontraban siempre dos factores presentes: reducían el trabajo de cálculo, y estaban siempre plagadas de errores.

Debido a la dificultad de algunos cálculos se debe destacar que en la época no era extraño que un científico dispusiese en su biblioteca de unos 125 volúmenes, contando el mismo Babbage que él disponía de unos 300 volúmenes de tablas de un tipo u otro. Un muestreo realizado por Babbage en 40 volúmenes dio un total de 3700 errores conocidos. La tarea de preparar tablas de cálculo era una tarea tan compleja que eran pocos los preparados para comenzar la realización de una de ellas y aún menos los capacitados para llevarla a buen fin.

El proceso de cálculo no era la única fuente de error en las tablas para el que sobrevivía lo suficiente para verlas publicadas. Numerosos errores provenían del proceso de impresión. Babbage decidió pronto en su carrera editar unas tablas libres de errores totalmente. Fueron publicadas en 1827 y de hecho eran las tablas más exactas hasta su época. No fueron recalculadas, si no copiadas de publicaciones previas. Para garantizar la exactitud, Babbage chequeó cuatro tablas diferentes que sabía que habían sido calculadas independientemente (lo cual en la época no era fácil). A continuación se pasó a imprenta y se comprobaron tres veces contra las mencionadas tablas. Finalmente fueron comprobadas por diferentes personas con otros juegos de tablas. Se encontraron tan sólo 32 errores en el manuscrito y 8 más en la versión impresa.

La gran mayoría de tablas no eran sometidas al gran número de comprobaciones que realizó Babbage. Por ejemplo, una de las tablas más famosas de multiplicar (Dr. Hutton, 1781) que contenían el producto de A por B (0 ### A ### 100, 0 ### B ### 1000) contenían 40 errores ¡ en una sola página !

El proceso ordinario de chequear los números en dos juegos distintos de tablas para cada valor no dejaba de ser peligroso. En 1825, por ejemplo, se encontró que había seis errores comunes en tablas aparentemente independientes. Un chequeo posterior mostró el mismo error en 20 tablas distintas publicadas en lugares tan diferentes como Inglaterra, Francia, Italia, Alemania, Holanda y China.

El método de obviar los errores era publicar una tabla de erratas, habitualmente conteniendo más errores de los que se intentaban subsanar.

## 4.3. El método de las diferencias

El método de las diferencias, pese a ser la herramienta principal para calcular las tablas, ha caído hoy en día en desuso. Se usaba para eliminar las operaciones de dividir y multiplicar reemplazando estas operaciones por restas y sumas al aproximar las funciones por polinomios. Por ejemplo, al evaluar f(x) = 2x+3 para los sucesivos valores de x y sus diferencias, se obtiene :

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| x | = | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| f(x) | = | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 |
| ###f(x) | = | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

para una función más complicada, por ejemplo f(x) = $x^2$+2x+3, se calculan las segundas ( o sucesivas) diferencias hasta obtener un valor constante. Por ejemplo

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| x | = | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| f(x) | = | 6 | 11 | 18 | 27 | 38 | 51 | 66 | 83 | 102 |
| ###f(x) | = | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 |
| ###$^2$f(x) | = | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

En general, si se evalúa un polinomio en $x^n$ se requieren las n diferencias hasta encontrar la diferencia constante. Para evaluar los sucesivos valores de un polinomio es más fácil realizar las sumas de las sucesivas diferencias hasta llegar al valor que realizar las multiplicaciones de los términos. Como ventaja importante, no se necesita multiplicar para evaluar un polinomio, sino sólo sumar.

Aun que los polinomios tienen una diferencia constante, funciones tales como los logaritmos y las funciones trigonométricas no poseen esta propiedad, con lo que para aprovechar éste método se debe aproximar la función en un tramo por medio de un polinomio, y evaluar el polinomio en vez de la función.

Una máquina en diferencias es una máquina capaz de almacenar una serie de números y realizar sumas con ellos. Estos números iniciales representan el valor de la función en un punto y sus sucesivas diferencias en este punto. Sumando la máquina las diferencias inferiores a las superiores de puede calcular el valor de la función. La primera referencia a una máquina de tal tipo apareció en 1786 en Frankfurt, por E. Klipstein, traductor de un artículo escrito por J.H.Müller, capitán de ingenieros de la armada Hessiana. Müller describe en un apéndice de su artículo una máquina mucho más ambiciosa que él podría construir si alguien se lo financiase. Esta máquina consistiría en una máquina de tercera diferencia constante y estaba diseñada según Müller para imprimir los resultados en una hoja de papel situada bajo la máquina. Con tal máquina que realizase una suma cada segundo un obrero podría realizar una tabla de los cubos del uno al 10000 en 10,5 días.

## 4.4. La máquina de diferencias de Babbage

Como se ha comentado, Babbage poseía la pasión por la exactitud. Se enfadaba terriblemente por los errores que encontraba en las tablas que se usaban en su época. Esta pasión invadió muchos aspectos de su vida y fue capaz de combinar su genio e iniciativa para producir inventos. Uno de éstos fue, naturalmente, una máquina en diferencias.

La idea se le ocurrió en 1812 o 1813 siendo un estudiante en Cambridge. Babbage no conocía el trabajo de Müller de medio siglo antes. Otros asuntos empujaron a Babbage a poner en práctica en los siguientes años la idea de la máquina en diferencias para calcular tablas.

Espoleado por la experiencia en la publicación de sus tablas, comenzó el diseño de una máquina de calcular e imprimir tablas matemáticas. El mecanismo debía situar el molde de la letra en la prensa para permitir la reproducción de las tablas, evitando los errores en la copia y transcripción. Su independencia económica le permitió abordar el problema y en 1822 mostró un modelo que trabajaba a sus amigos. Había construido una máquina para trabajar con números de 6 cifras y capaz de evaluar funciones con segunda diferencia constante.

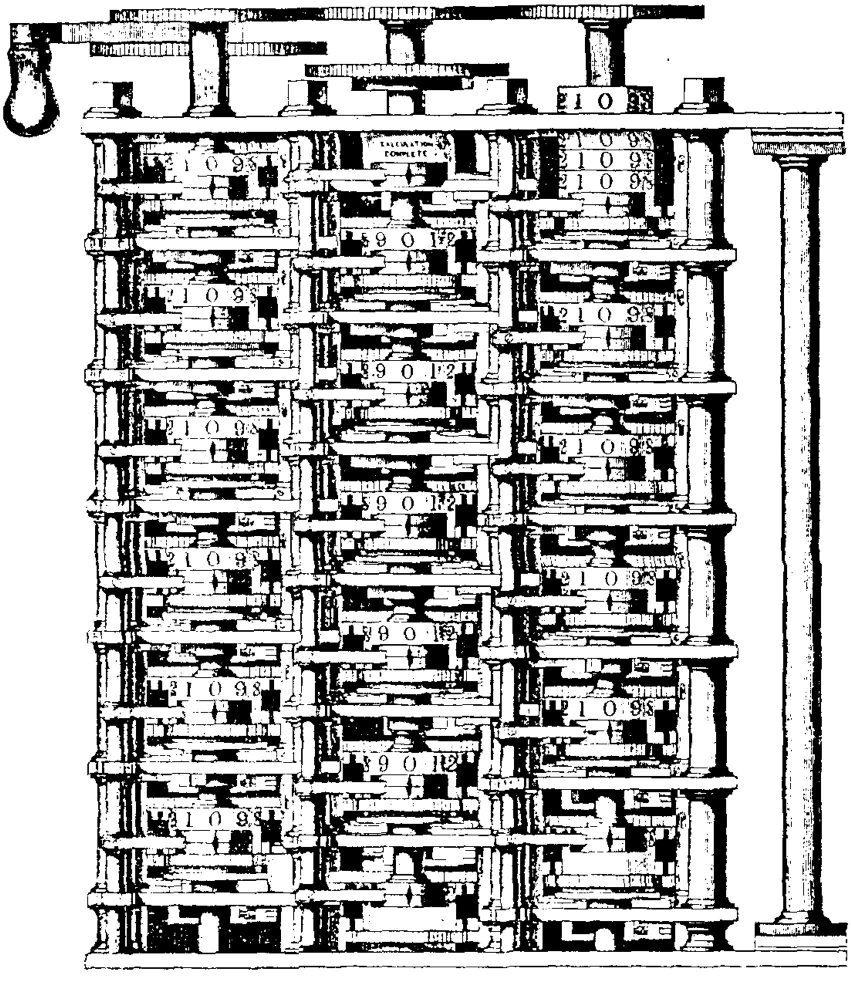

*Figura 4.1El prototipo de la máquina de calcular diferencias de Babbage*

Babbage escribió al presidente de la Royal Society, Sir Humphrey Davy, describiendo su máquina como "*capaz de producir cifras a razón de 44 por minuto y capaz de realizar con rapidez y precisión todos los cálculos para los que fue diseñada*". Mediante esta carta quería pedir la ayuda de la Royal Society para pedir financiación al Gobierno en la construcción de una máquina de tamaño mayor.

En 1823 le concedieron 1500 libras, y Babbage puso entre 3000 y 5000 libras de su propio bolsillo, confiando en recuperar la cantidad aportada del gobierno al acabar la máquina en dos o tres años.

Comenzó a realizar algunas piezas del modelo en un taller local, debiendo comenzar por el diseño de máquinas nuevas para fabricar las piezas ya que en el país no existía tecnología suficiente. Diseñó con gran cuidado las piezas, y las máquinas para fabricarlas, repitiendo varias veces el proceso para mejorar el diseño de las piezas. Gracias a Babbage, la mecanización y fabricación de máquinas herramientas avanzó enormemente. El dinero gastado por el gobierno hubiese sido una buena inversión solamente con este motivo.

Tanta actividad acabó por enfermarlo en 1827, debiendo tomar descanso y viajando a Italia con tal motivo. Aprovechó para realizar balance, descubriendo que había gastado 3475 Libras, escribiendo al gobierno para recuperar las 1975 libras de su bolsillo. El ministro dijo haber olvidado su acuerdo verbal, con lo que recurrió a influencias para refrescarle la memoria, acabando por conseguir una financiación por 3000 libras adicionales.

Estos contratiempos le interrumpieron su trabajo creativo y durante el periodo de convalecencia gran parte del personal de su taller se despidió, incluyendo a Mr. Clement, su jefe de taller, quién de acuerdo a los derechos que le otorgaba la legislación retiró todos los útiles y planos desarrollados. Posteriormente devolvió los planos que Babbage había realizado.

Durante este periodo sin taller ni planos, mientras intentaba modificar de nuevo el diseño, concibió la idea de su máquina analítica. Decidió que si acababa por construir esta nueva máquina requeriría una unidad aritmética mucho más sofisticada. Experimentó con nuevos mecanismos, unos 20 aproximadamente, y por fin llegó a un diseño que no necesitaba mejoras. Informó al gobierno que le llevaría menos tiempo y dinero realizar una máquina en diferencias con el nuevo diseño que realizarla con el antiguo.

Las noticias de un nuevo rediseño no cayeron muy bien en el gobierno. Este hecho, y un cambio de gobierno ocasionado por las elecciones, ocasionaron la pérdida del apoyo que recibía Babbage y se le notificó que el gobierno no iba a continuar con el proyecto autorizando a Babbage a quedarse con lo realizado hasta el momento. Lo realizado se encuentra hoy en día en un museo.

La máquina tal y como la describe Babbage consta de siete ejes verticales, cada uno con 18 ruedas de bronce, representando cada rueda un dígito, cada eje un registro de diferencia y el séptimo eje el registro que almacena el valor computado. Cada rueda llevaba grabados los dígitos del 0 al 9 en su circunferencia, y el giro de las ruedas visualizaba los dígitos, 18 por cada eje vertical,con las unidades en la parte inferior. La disposición vertical del eje se decidió para minimizar la fricción debida a la gravedad, frente al diseño horizontal.

Junto a cada juego de ruedas que disponía el mecanismo para realizar el acarreo de una rueda a la otra, se disponía del mecanismo de suma de una cifra a la siguiente. Poseía un mecanismo de embrague para desengranar las ruedas de suma a voluntad.

La máquina operaba en cuatro fases, cada una en un cuarto de vuelta de giro de la manivela de accionamiento. El primer ciclo causaba que el número de la 1ª, 3ª y 5ª diferencia se sumasen a los números almacenados en los registros de la 2ª, 4ª y 6ª diferencia. En el segundo ciclo se sumaban los acarreos del primer ciclo. El tercer ciclo causaba que el número de la 2ª, 4ª y 6ª diferencia se sumasen a los números almacenados en los registros de la 1ª, 3ª y 5ª diferencia, mientras que en el último ciclo se sumaban los acarreos del tercer ciclo.

Disponía de varios mecanismos de fallos seguros para proteger la máquina y detener la máquina en caso de error. Mediante un sistema de muelle se garantizaba el posicionamiento correcto de las ruedas. Si el problema era grave, y el mecanismo no lo solventaba, se bloqueaba la máquina evitando cualquier cálculo hasta la resolución del problema.

Mediante varios ingeniosos mecanismos añadidos al diseño básico de los registros se pueden calcular las funciones con diferencias no constantes. Por ejemplo, para calcular una tabla de logaritmos, se aproximaba la función logaritmo por un polinomio evaluándolo en 100 valores y determinando un nuevo polinomio para la siguiente porción de la tabla. El mecanismo permitía, tras un cierto número de cálculos, avisar por medio de una campana al operador de la necesidad de iniciar las ruedas de las diferencias para calcular un nuevo polinomio. Mediante otros ajustes se podía añadir cualquier diferencia cualquier número de veces a una diferencia de cualquier orden, permitiendo la computación con diferencias no constantes, y formadas por series geométricas, como las encontradas en tablas astronómicas.

Otra propiedad destacable era que la máquina podía usarse para calcular las raíces racionales de ciertas funciones. Mediante transformaciones se puede conseguir que las raíces sean enteras, y la máquina podía ser ajustada de manera que podía producir los valores de las funciones transformadas. Las raíces imaginarias ocasionan que la primera diferencia sea cero, con lo que mediante un mecanismo que detectaba este valor se accionaba una campana que podía alertar al operador para anotar los valores de las diferencias y calcular los valores imaginarios a partir de los valores en los registros.

18 dígitos eran suficientes para muchos cálculos, pero debido a que Babbage conocía los errores debidos al redondeo, era posible configurar su máquina en modo de unir dos registros y formar uno sólo de 30 dígitos, operando en la máquina con una tercera diferencia constante.

La impresión se realizaba mediante moldes asociados a las ruedas que representaban el resultado final. Se accionaban por levas que movían unos brazos con diez perforadores que actuaban sobre una plancha de cobre o plomo que permitía la impresión en la prensa. Cada vez que se giraba la manivela la plancha de cobre o plomo avanzaba una posición.

En 1849, mientras trabajaba en la máquina analítica, Babbage dibujó los planos de su máquina en diferencias. estos planos fueron el conjunto más complejo de una máquina mecánica nunca dibujado, usando unos 1000 pies cuadrados de papel.

En esta época, el gobierno inglés acabó financiando una máquina en diferencias diseñada en Suecia.

## 3.5. La máquina de diferencias de Scheutz

Parte de los trabajos de Babbage fueron descritos en una revista divulgativa (*Edinburgh Review*) por D. Lardner. Este trabajo fue leído por George Scheutz, que era editor de una revista técnica en Estocolmo, quién entendió que la máquina descrita por Lardner sería de gran ayuda en todas las ramas de la ciencia. El artículo de Lardner estaba escrito para se leído por el público en general, y sólo era una somera descripción de lo que la máquina en diferencias podía hacer, sin describir en detalle el diseño. Scheutz quedó tan fascinado por el concepto que en vez de escribir a Babbage para obtener detalles de su construcción, empezó a diseñar él mismo una máquina.

Comenzó con el diseño de los componentes básicos, y fabricó varios modelos en madera y alambre. Tras verificar que su diseño era práctico puso manos a la obra para construir una máquina real. Ayudado por su hijo Eduard, en octubre de 1837 concluyeron que la máquina estaba fuera de sus medios económicos, pudiendo ayuda al gobierno sueco, que lo rechazó tras la mala experiencia inglesa en el asunto.

Continuaron los trabajos padre e hijo, finalizando en 1840 una máquina para operar a partir de la primera diferencia con dos registros de 5 dígitos. En 1842 la máquina había sido ampliada hasta la tercera diferencia. En 1843 la máquina poseía ya un mecanismo de impresión, siendo remitida a la Academia Sueca de las Ciencias para su aprobación. La Academia recomendó al gobierno la financiación del proyecto, sin éxito.

En 1851 George Scheutz, animado por sus amigos, solicitó de nuevo al gobierno ayuda para la construcción de una máquina completa, siendo rechazada de nuevo la solicitud. Un miembro del parlamento recibió el asunto e involucró al rey, que dio finalmente su aprobación. Los inventores pidieron el dinero por anticipado en 1851 al gobierno quien finalmente lo dio con loa garantía de recuperación si la máquina no estaba finalizada en 1853 a entera satisfacción del rey.

La máquina en diferencias (tabuladora, como la llamaban los Scheutz) estuvo completa en octubre de 1853. Difería ligeramente del diseño original al incorporar mejoras para calcular tanto en decimal como en sexagesimal para facilitar los cálculos de horas y ángulos.

En Londres, el ingeniero Brian Donkin conoció el progreso realizado en Estocolmo. Había conocido el proyecto de Babbage como miembro de la Royal Society. En el año 1854 Donkin consiguió traer la máquina sueca a Londres y lo notificó a la Royal Society. Babbage inspeccionó la máquina y dio el visto bueno a la máquina y a sus inventores. Los Scheutz nunca negaron a Babbage su admiración por la idea original de la máquina en diferencias.

La máquina fue posteriormente exhibida en París en la Gran Exposición, obteniendo la Medalla de Oro, siendo comprada por un observatorio astronómico americano.

El diseño era muy similar al de Babbage. Cada registro contenía 15 dígitos, cada uno en un anillo de bronce plateado y montado en posición horizontal. Existían 5 filas de anillos, cuatro para las constantes de las diferencias y una para el resultado. El mecanismo estaba montado en 15 ejes horizontales.

La Figura 4.2 muestra el modelo que los Scheutz construyeron para mostrar el funcionamiento de su máquina.

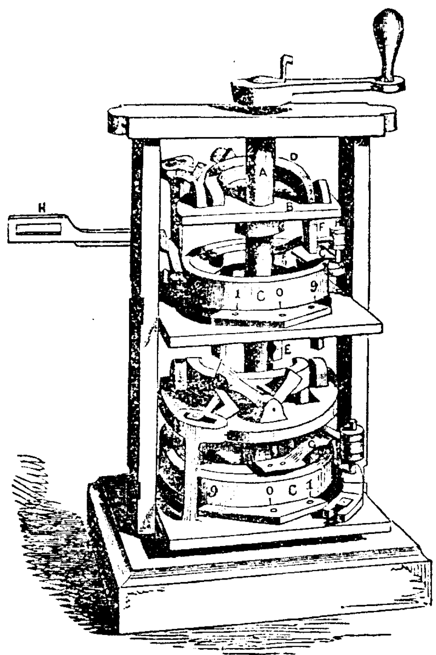

*Figura 4.2 Mecanismo de la máquina en diferencias de Scheutz*

El mecanismo de impresión era idéntico al de Babbage, y redondeaba las cifras antes de imprimirlas. El principio de añadir primero las diferencias pares y después las impares también fue empleado en el diseño.

Cuando trabajaba con un operador entrenado podía generar 120 líneas por hora. En un experimento realizado se calcularon los logaritmos de 1 a 10000 en 80 horas, incluyendo el tiempo de reposición de los registros para los 20 polinomios de aproximación.

El gobierno inglés, a instancias del Registro General (responsable de la recolección y publicación de estadísticas) compró una máquina de la compañía de Donkin fabricada con el diseño de los Scheutz, idéntica a la anterior. El Registro General contaba con el apoyo de la Royal Astronomer que deseaba acceder a los medios que disponían sus colegas americanos. Durante la vida útil de esta máquina se produjeron unos 600 tipos diferentes de tablas.

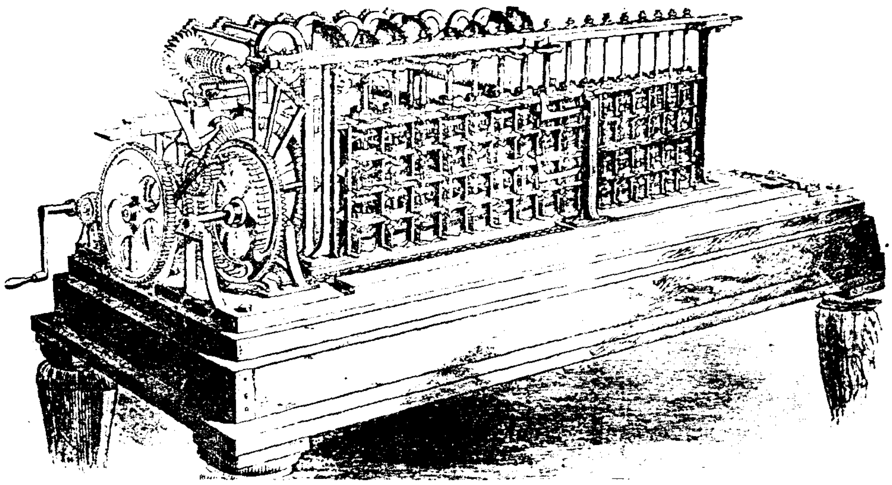

*Figura 4.3 La máquina en diferencias de Scheutz*

## 3.6. La máquina analítica de Charles Babbage

Aunque la máquina en diferencias es un desarrollo importante en la computación, fue otra idea de Charles Babbage - la Máquina Analítica - la que señaló un nuevo concepto en la computación, la máquina de calcular controlada por programa externo.

Babbage trabajó en la máquina en diferencias hasta interrumpir sus actividades por falta de financiación gubernativa. En este intervalo discutió con su jefe de taller, Mr. Clement, quien lo abandonó llevándose herramientas y planos.

Al tener que suspender todo trabajo en actividades prácticas , repensó todo el sistema desde el principio. Para obtener más flexibilidad en su diseño se le ocurrió la posibilidad de que los dígitos de cualquier registro pudiesen llevarse a cualquier registro de diferencias para calcular funciones sin solución analítica. El control de tal diseño requería una disposición circular de los registros.

Al trabajar con este diseño se le ocurrió que todos los registros podrían ser idénticos, de tal modo que no los limitó a añadir una cantidad a su vecino, sino que los concibió como un almacén de números. Los números podían pasar de un registro a otro con un proceso aritmético entre ambos.

Se cree que estas ideas le llegaron en 1834. Babbage continuó su diseño y rediseño de las partes antiguas sin construirlas. Desarrolló el concepto de la Máquina Analítica como un ejercicio académico, conociendo las dificultades prácticas para su construcción. Se poseen numerosas evidencias de que algunos componentes no podían ser construidos en la época sin gran dificultad.

El continuo cambio de diseño, que prosiguió hasta el final de su vida, dificulta la descripción de su máquina. En 1840 el diseño estaba casi completo, realizando a partir de este momento sólo pequeños cambios. En esta época, la máquina puede describirse como sigue:

Cada circulo de la Figura 4.4 representa una columna de ruedas y engranajes que forman un registro, similar a los de la máquina en diferencias. Este dibujo muestra unas 200 columnas de ruedas de engranajes y ruedas de números, siendo usadas muchas de ellas para detallar los mecanismos de control, pudiendo ignorarlas para conocer el concepto básico de la máquina. La máquina puede verse como tres secciones básicas, el *Almacén*, el *Molino* y las *Barras de Control*. El Almacén corresponde a nuestra memoria moderna, el molino corresponde a la unidad aritmética y las Barras de Control son primitivas unidades de control microprogramadas.

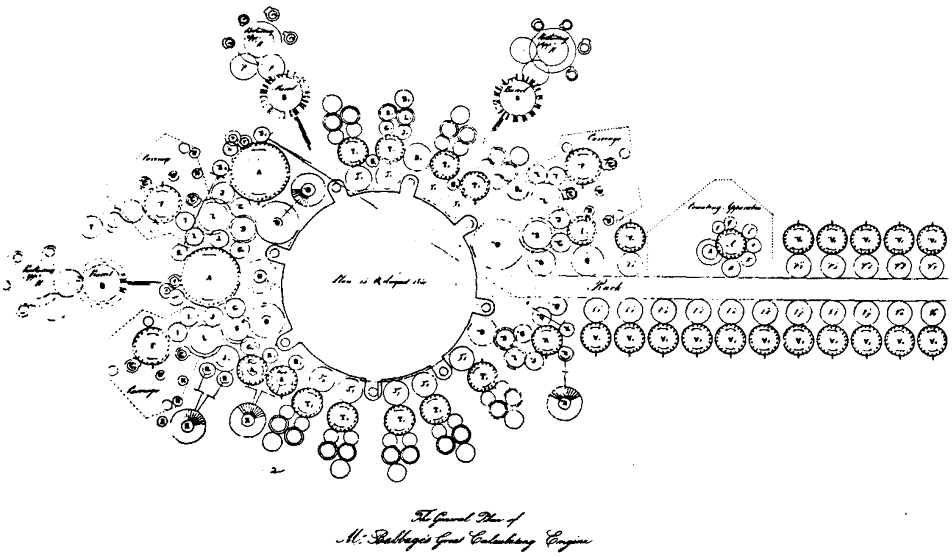

*Figura 4.4 los planos de la Máquina Analítica de Charles Babbage*

El almacén es una versión modificada de los registros individuales de su máquina en diferencias. Cada columna etiquetada como V en el dibujo puede almacenar un número mediante una serie de ruedas, cada cual puede girar a diez posiciones para almacenar los dígitos individuales del número. El diagrama muestra 16 columnas (cada una almacena dos números), pero el diseño era abierto para permitir añadir más columnas de almacenamiento (memoria) al sistema. En algunos de sus escritos, Babbage dice querer dar a su máquina una capacidad de 50 columnas (100 números de 40 dígitos decimales). En otro escrito comenta que realizó el diseño para 1000 números de 50 dígitos. Cada número podía pasar al molino mediante una sencilla cadena de engranajes, representado en el dibujo por las lineas largas paralelas que se extienden a la derecha del dibujo.

El molino consiste en una disposición compleja de engranajes y enlaces distribuidos alrededor de un círculo central. En sus más elementales formas consta de dos acumuladores (A y A') y los engranajes asociados para realizar las operaciones necesarias de acarreo de un dígito al siguiente. Existe un tercer acumulador A'' donde la cadena de engranajes se une al molino, que estaba diseñado como registro auxiliar para operaciones como multiplicación y división. Cuando la máquina realizaba una operación de multiplicar de X por Y se disponían de los nueve múltiplos de X (x, 2X, 3X, ... ,9X) en nueve "pequeños" ejes de tablas (marcados como T1, T2, ..), de forma que los nueve múltiplos se podían sumar al registro según lo requerido por el correspondiente dígito de Y. En la multiplicación, los dos acumuladores principales se conectaban entre sí para actuar como un registro de tamaño doble. La división se realizaba en un modo similar.

Las Barras de Control (marcadas como B) eran similares a grandes tambores de cajas de música, que realizaban las instrucciones básicas de micronivel. Los tambores se podían mover adelante y atrás, enganchando y desenganchando las levas y los engranajes que se necesitaban para implementar los diferentes pasos de las instrucciones. Cada una de las tres barras de control podía no sólo contener levas para posicionar los diferentes engranajes, sino que podía saltar mediante un código a cualquier posición para implementar los siguientes micropasos de la instrucción. Por lo tanto implementaban nuestro concepto de microcódigo en el que cada microinstrucción contiene las operaciones básicas a realizar y la dirección donde encontrar la siguiente microinstrucción.

La última gran estructura, marcada como "*Counting Apparatus*" era simplemente un registro contador, similar al de la máquina en diferencias, que podía emplearse para conocer el número de veces que se realizaba una operación particular. Podemos identificarlo como un registro contador de bucles de los computadores actuales.

Babbage indica que el ciclo básico de su máquina analítica dependía del tipo de operación a realizar, por ejemplo, tomaría 2,5 segundos transferir un número del almacén al molino, mientras que una suma tomaría unos 3 segundos. El tiempo adicional entre el movimiento de datos y la suma corresponde al tiempo necesario para el acarreo. Aunque parezca lento, era muy rápido para la época de Babbage. Cien años después, la máquina de Aiken, el Mark I, tardaba en sumar por medios electromecánicos 0,3 segundos. Una modificación posterior de a Máquina Analítica amplió el diseño a 50 dígito cada registro, con un tiempo de suma de 1 segundo y multiplicaciones y divisiones de 1 minuto.

Una de las partes más importantes y difíciles es el mecanismo que trata del problema del acarreo generado al sumar un número a otro. Por ejemplo, 9+1 ocasiona 0 en el dígito de las unidades y la suma de 1 al dígito de las decenas. El mecanismo de acarreo elemental fue resuelto por Babbage en sus primeros diseños, pero el problema más complejo del "acarreo encadenado" (999999+1) ocasionaba en la máquina un ciclo extra por acarreo generado. Resolvió el problema mediante el llamado mecanismo de "*acarreo anticipado*". El mecanismo detectaba un 9 almacenado en un dígito y por lo tanto ocasionaba un acarreo hasta el primer dígito distinto de 9.

Este mecanismo de "*acarreo anticipado*" fue diseñado usando la idea de una "*cadena*" que Babbage usaba además en otras partes de la Máquina Analítica. Se puede pensar en la cadena como en una larga fila realizada a partir de pequeños segmentos individuales que se pueden mover en conjunto al empujar una fuerza un extremo. Cuando todos los segmentos están en posición, al empujar una fuerza un segmento contra otro transmitiendo el movimiento de la fila. Si se retira uno de los segmentos en el centro de la fila, al empujar el extremo sólo se mueve la porción en contacto con la fuerza actuante, por faltar el segmento que aísla el movimiento. Moviendo cada segmento fuera de alineación por la acción de la máquina se tiene en cierto modo una puerta AND mecánica en la que el esfuerzo se transmite el final de la barra si todos los segmentos están alineados. El dispositivo de acarreo completo se basaba en este invento.

Si en la Figura 4.5 los círculos representan un dígito del número almacenado, cuando se ha realizado la suma algunos de los dígitos pueden avanzar del 9 al 0 y generan un acarreo que se debe propagar al siguiente dígito. Si cualquier dígito genera un acarreo, el selector de tres posiciones asociado a ese dígito se acciona a la posición A. Si un dígito almacena un 9, queda en la posición B. Al finalizar la suma, un empujón a la barra de acarreos transmite el movimiento de todos los acarreos de golpe a todos los dígitos. Un circuito electrónico similar a este fue empleado en las primeras máquinas tabuladores por Hollerit.

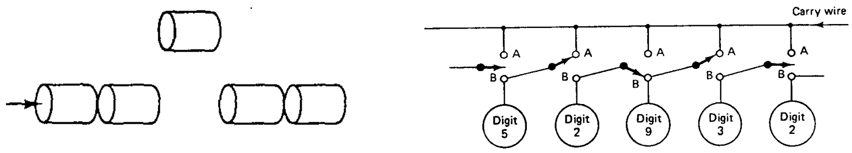


*Figura 4.5 Mecanismo de la acarreo anticipado de Babbage y su equivalente eléctrico*

De haberse construido la versión de 1840, la Máquina Analítica tendría 5 metros de alto, el molino 2 metros de diámetro y el almacén de 3 a 6 metros, en función del número de registros. Se precisaba en la fabricación unas tolerancias de 0,05 mm. en cada componente, alcanzable en la época sólo a un coste considerable.

Babbage nunca escribió una descripción completa de su Máquina Analítica, pero en uno de sus viajes a Italia describió detalles de la misma a varios individuos interesados, de los cuales L. F. Menabrea escribió una descripción publicada posteriormente en Suiza. Una amiga de Babbage, Ada Augusta Condesa de Lovelace, tradujo el artículo al inglés con comentarios que detallaban como funcionaba el computador.

El programa de la Máquina Analítica de Babbage se almacenaba en series de tarjetas perforadas, idea que tomó Babbage al ver trabajar los telares Jacquard. Las tarjetas que formaban un programa se ataban entre si. El lector de tarjetas podía leer una instrucción, por ejemplo V1*V3, lo que ocasionaba a la barra de control correspondiente ejecutar los micropasos que implementaban la instrucción. Se podían realizar lazos ya que había instrucciones del tipo "*si el contador almacena un número inferir a N, retroceder las tarjetas Q posiciones y comenzar otra vez*". Otras instrucciones , como "*saltar N tarjetas*" daban a la máquina la flexibilidad requerida por Babbage para realizar sus cálculos.

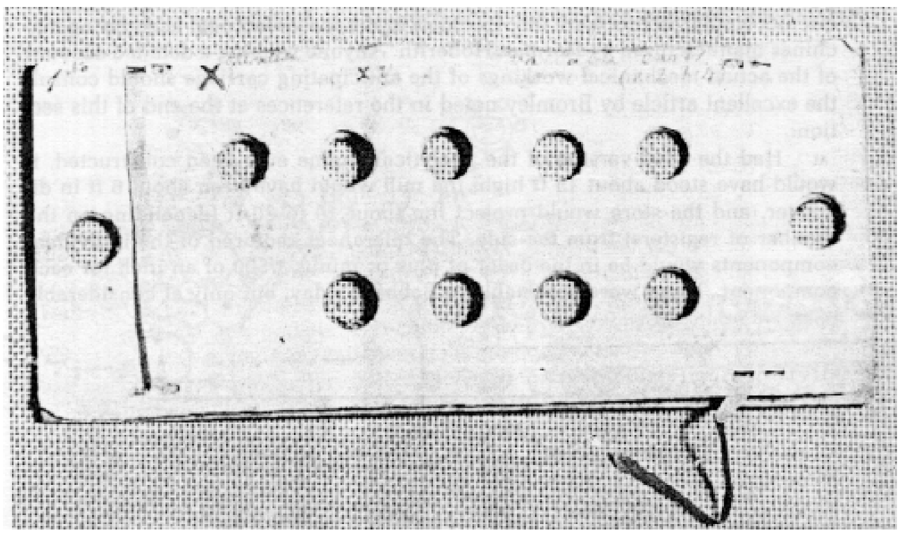

*Figura 4.6 Tarjetas perforadas de telar, que Babbage esperaba utilizar en su Máquina Analítica*

Babbage mantuvo la idea de que la Máquina Analítica era un ejercicio académico. No fue construida en la vida de Babbage. Su hijo Henry Babbage contrató la construcción del molino a partir de sus diseños, se acabó en 1906 y se empleó únicamente para calcular los 25 primeros múltiplos de ### con 29 cifras, para demostrar que el diseño funcionaba correctamente. En la actualizad se encuentra en el Museo de Ciencias de Londres.

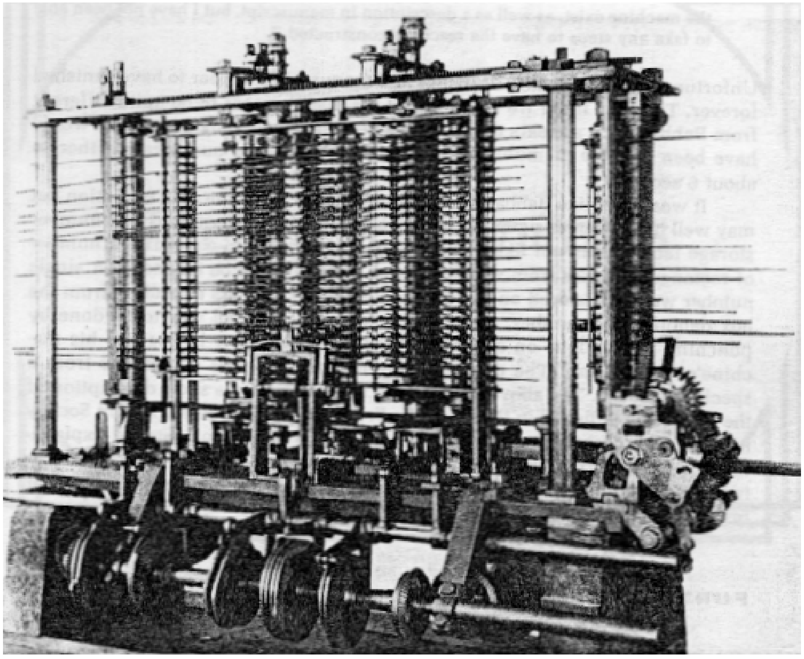

*Figura 4.7 El Molino de la Máquina Analítica de Babbage*

## 3.7. Percy Ludgate

Parece que hubo otra máquina analítica diseñada, no construida, en 1908. Percy Ludgate era un contable irlandés que diseñaba máquinas de cálculo en sus ratos libres. En una publicación declaraba:

> "*He diseñado yo mismo una máquina analítica, de tipo diferente a la de Babbage, para trabajar con 192 variables de 20 cifras. Existen planos completos de la máquina, así como una descripción manuscrita, pero no he podido dar los pasos necesarios para construirla*"

Los planos y los manuscritos no han sido encontrados, sabiéndose únicamente que la máquina era diferente a la de Babbage, más pequeña, y que multiplicaba en 6 segundos. Era enteramente mecánica en su operación, pudiéndose accionar mediante un motor eléctrico. El almacenamiento de números consistía en una serie de cajas rectangulares sobre las que se deslizaban unas barras. Cada número se almacenaba en una caja, siendo cada barra un dígito. El control se realizaba por cinta de papel perforado que leía la unidad de control de la máquina. La unidad de control podía manejarse también desde un teclado. No se conoce más de esta máquina.