

COMPLEJIDAD Y DIMENSIONES EN LOS
ESTUDIOS SOBRE BABBAGE:
LA MÁQUINA ANALÍTICA.
UN ANÁLISIS DEL FRACASO CULTURAL DEL PRIMER
PROYECTO DE CALCULADORA DIGITAL
PROGRAMABLE SECUENCIALMENTE

JUAN P. GIUDICE
Universidad del País Vasco

Resumen. En este artículo se analiza el caso histórico de la máquina analítica de Babbage junto con algunos otros ejemplos relacionados, con la intención de comprender qué tipo de condiciones retrasaron el advenimiento de la «revolución de los ordenadores» hasta un siglo después de los primeros diseños de calculadoras programables multi-propósito. La respuesta a este interrogante proviene de una hibridación entre el enfoque socioeconómico de los estudios de ciencia, tecnología y sociedad y la teoría de la complejidad aplicada a los fenómenos sociales en la historia de la técnica. Como conclusión se prueba que el propio Babbage pudo ser consciente de estas constricciones en la estructura social de los medios de producción que retrasarían la emergencia del cálculo automático durante un siglo.

Abstract. This article analyses the historical case of the Babbage's machine and other related examples in order to understand the conditions delaying the coming of the «computer revolution» during one century since the first designs of programmable calculators. The response derives from the joining of both the STS socioeconomic approach and the complexity theory applied to social phenomena in the history of technology. As a result, it is showed that Babbage could be conscious of these constrictions in the social structure, which would be responsible for the delay of the emergence of automatic calculus during one century.

EL ORIGEN Y DESARROLLO CULTURAL DEL CÁLCULO AUTOMÁTICO

El caso de la máquina analítica de Charles Babbage es uno de esos extraños episodios en la historia de la ciencia y la tecnología en los que un extraordinario avance conceptual y mecánico –a saber, la preparación, entre los años 1834 y 1847, de los planos y mecanismos de una máquina calculadora programable, de propósito general y gran capacidad: la máquina analítica (Analytic Engine)– queda desaprovechado por la cultura circundante durante unos cien años, hasta que, en virtud de la emergencia de los ordenadores electrónicos durante la segunda guerra mundial, se desencadena un proceso tecnocientífico, económico e histórico definitivo, mediante un continuo perfeccionamiento tecnológico e industrial, parejo a la generalización de su uso por diferentes sectores culturales y sociales durante la segunda mitad del siglo XX, que desemboca en la llamada «sociedad de la información», un entorno tecnológico de producción en cadena y consumo masivo de ordenadores personales de propósito general.

Este aparente retraso proporciona un material único para el estudio de las condiciones determinantes en el origen y evolución de la tecnología científica más característica de nuestra cultura: la tecnología de alta complejidad. Para ilustrar algunas de estas condiciones intentaremos contestar a una pregunta paralela a la hipótesis del retardo de un siglo en la emergencia cultural del cálculo automático:

¿Cuáles son las condiciones que no se satisfacen en el caso de la máquina analítica de Babbage?

En lugar de analizar el surgimiento de los ordenadores modernos, tema perfectamente tratado en otros lugares, juzgaremos algunas de las posibles causas por las que la máquina analítica de Babbage no generó una revolución de los ordenadores durante el siglo XIX, nuestra intención con esto es delimitar la clase o el tipo de condiciones que deciden la implantación o el olvido en el ambiente social y cultural de los avances tecnocientíficos de alta complejidad.

Pero antes de introducirnos en las revueltas aguas del análisis multicausal, será necesario mostrar que no hay un serio desajuste entre las estructuras mecánicas proyectadas por Babbage en la máquina analítica y las funciones aritméticas y lógicas de una calculadora programable multipropósito. Gracias a los estudios de historia de la ingeniería realizados durante las últimas décadas del siglo XX¹, tenemos

la certeza de la extrema corrección mecánica y lógica de los diseños de las máquinas analíticas de Babbage. Además, hay que recordar que el estudio de dichas máquinas había inspirado a H. H. Aiken en el desarrollo del pionero ASCC o Mark I², Dada la importancia de este punto sobre el ajuste entre estructuras y funciones de la máquina analítica, antes de analizar las condiciones históricas en las que esta surge, daremos una caracterización mecánica de la misma, la cual, aunque muy somera, demasiado general y alejada del contexto, bastará para convencer de su posibilidad y para informar sobre su potencia y su naturaleza.

LA MÁQUINA ANALÍTICA DE BABBAGE HACIA 1838

No se puede hablar de una sola máquina analítica, ya que Babbage investigó múltiples opciones y perfeccionó el diseño en varias direcciones diferentes, por lo tanto, nos vemos obligados a escoger una parte del trabajo, en particular, el desarrollado hacia 1838. Durante esta etapa media de la evolución de la máquina analítica ya se muestran sus atributos principales y definitivos, aunque en una forma que será simplificada durante los años siguientes. Hemos escogido este ejemplo porque esta muy bien documentado, tanto por bibliografía primaria³

¹ ASPRAY, BROMLEY, CAMPBELL-KELLY, CERUZZI, WILLIAMS (1990), WILKES (1981), WILKES (1991), BROMLEY (1982), BROMLEY (1987), FRANKSEN (1981).

² Howard H. Aiken, responsable del proyecto del legendario MARK-1, comienza la primera página del manual de operación de esa máquina con una bella cita de Babbage, para luego referirse a él varias veces, en una corta introducción histórica, presentándolo como el primero que vio la necesidad de construir una calculadora programable automática; la conclusión de Aiken es que Babbage, como "filósofo naturalista" no estaba lo suficientemente familiarizado con los problemas mecánicos, y su obra sólo pudo ser completada con la tecnología electromecánica del siglo XX. Ver *STAFF OF THE HARVARD COMPUTATION LABORATORY* (1946, pp. 1, 4-8).

³ La primera mención de la máquina analítica, BABBAGE (1834), es una carta enviada al duque de Wellington, primer ministro en aquel año. La primera descripción profunda de dicha máquina, BABBAGE (1837a), es un manuscrito entregado por Babbage a su amigo H. W. Buxton, quien tenía intención de escribir una historia sobre sus máquinas, editada recientemente: BUXTON (1988). Sin embargo, la mejor descripción contemporánea es la extensa traducción y las notas escritas (bajo la supervisión y consejo de Babbage) por Ada Lovelace del artículo de ingeniería descriptiva compuesto en italiano por Luigi Menabrea, con ocasión de la estancia de Babbage en Turín, LOVELACE-MENABREA (1843), al cual Babbage añadió algunas explicaciones, BABBAGE (1843). Además de esto, Babbage consagró un capítulo de su autobiografía a la máquina analítica, BABBAGE (1864, cap. VIII). Todos estos documentos y muchos otros textos de y sobre Babbage están

como secundaria⁴, y representa la etapa clásica, en la que el proyecto alcanzó fama internacional.

Babbage concibió la idea de una máquina calculadora de propósito general⁵ mientras trabajaba en un proyecto anterior de calculadora automática⁶ que usaba el método de las diferencias finitas para tabular polinomios con la última diferencia constante: La máquina de diferencias. Este primer invento, tenía como única función el sumar uno so-

2ªDif.	1ªDif.	x^2	x
2	1	0	Inicio
2	3	1	1
2	5	4	2
2	7	9	3
2	9	16	4
		25	5

Ejemplo del método de diferencias para $y = x^2$

disponibles gracias a la cuidadosa edición de las obras completas de Babbage, CAMPBELL-KELLY (1989). Por si esto fuera poco, en la biblioteca del South Kensington Science Museum (Londres), se guardan 7.000 páginas de manuscritos de trabajo de Babbage sobre la máquina analítica, además de un número parecido de planos y notaciones.

⁴ Los principales son un estudio detallado del funcionamiento, la estructura y la evolución de la máquina analítica, BROMLEY (1982), y un monográfico donde se analiza la historia técnica y social de las diferentes calculadoras de Babbage, COLLIER (1990).

⁵ Es decir, en la terminología contemporánea, un sistema automático, capaz de registrar sus resultados, preparado para realizar cualquier algoritmo preestablecido con números y operaciones aritméticas. En la terminología de Babbage, «una máquina capaz de encarnar los principios más generales del análisis matemático», o «máquina analítica».

⁶ La «máquina de diferencias»: Aunque este proyecto anterior (1822) era mucho menos ambicioso intelectualmente que la máquina analítica, pues sólo podía desempeñar una función (tabular polinomios con la última diferencia constante), suscitó un gran interés público, y Babbage se vio envuelto en un ambicioso proyecto en colaboración con el gobierno.

A pesar de los progresos realizados en forma de planos, piezas y máquina-herramienta innovadora (ver siguiente sección), el proyecto resultó un fracaso debido a la falta de entendimiento entre los sucesivos gobiernos británicos (durante la convulsa época histórica que rodea el *Reform Bill*), Clement, el genial ingeniero mecánico contratado para el proyecto, y el propio Babbage.

bre otro⁷ los valores iniciales de cada orden de diferencias⁸, estos números se representaban en columnas de ruedas numeradas y dentadas, la suma se realizaba mediante unos engranajes fijos entre los ejes⁹.

El objetivo de este aparato era producir tablas numéricas libres de error, una de las principales necesidades estratégicas del mayor imperio marítimo de la época¹⁰, por ello la máquina de las diferencias debía dotarse de los mecanismos para imprimir automáticamente los cálculos¹¹.

La nueva máquina analítica se beneficiaba de toda la experiencia acumulada por Babbage en el proyecto anterior, sobre todo, de un instrumento teórico que había desarrollado trabajando en la máquina de diferencias; la notación mecánica¹², mediante la cual podía representar todas las interacciones entre las piezas móviles de una máquina en cada momento de su ciclo de operación. El valor de este método era al mismo tiempo heurístico y predictivo, permitiendo al mismo tiempo inventar nuevas máquinas y simplificarlas o comprobar su funcionamiento correcto.

⁷ Se suma la última diferencia, la penúltima, etc., hasta llegar al valor deseado, cuando se reinicia el proceso para el siguiente cálculo de la tabla, todos los valores de las diferencias han cambiado menos el de la última, por ello los polinomios así calculados tienen que tener la última diferencia constante.

⁸ Estos valores tenían que introducirse moviendo a mano las ruedas numeradas.

⁹ Estos engranajes comunicaban todos los dígitos de un eje sobre los del siguiente al mismo tiempo (en paralelo), pero las llevadas correspondientes a cada suma se realizaban de modo secuencial (primero las unidades, luego las decenas, etc.) mediante un complejo mecanismo que rodeaba cada eje.

¹⁰ Errores en las tablas astronómicas o logarítmicas usadas en los cálculos de navegación podían ocasionar graves naufragios, por ello la corrección en los cálculos era motivo de estado.

¹¹ El principal motivo para la evolución hacia una máquina más general fue la existencia de números tabulares tan útiles como los senos o los logaritmos que presentan una tabla de diferencias con la última diferencia variable; esto llevó a Babbage a intentar realimentar el eje de la última diferencia con valores provenientes de otras diferencias o del resultado parcial.

Desgraciadamente, la realimentación de la última diferencia mediante la suma no era suficiente; por ejemplo, en la última diferencia de la tabla del seno hay una constante fraccionaria multiplicada por el valor anterior de la tabla. La conclusión de Babbage es clara: si hay que realizar mecanismos multiplicadores y divisores no merece la pena conformarse con un método matemático tan limitado como el de las diferencias finitas, sino que es necesario extender el poder del mecanismo a la totalidad del análisis matemático.

¹² La primera referencia a esto es de BABBAGE (1826a), esta herramienta mecánico-algebraica fue luego perfeccionada, BABBAGE (1851), aunque no tuvo ninguna repercusión entre mecánicos ni ingenieros.

Aunque el diseño general de la máquina analítica sigue principios muy distintos, los elementos principales de almacenamiento y transmisión numérica están basados en ejes de ruedas numeradas y dentadas comunicados por engranajes¹³, en cierto modo similares a los de la máquina de diferencias, con tres salvedades:

- a) La transmisión entre ejes puede engranarse o desengranarse automáticamente según las necesidades del cálculo. Algunos de estos engranajes pueden alterar la transmisión cambiando la posición decimal del número transmitido (multiplicando o dividiendo por 10 de manera sencilla)
- b) Como el proceso de lectura es destructivo, ya que implica la reducción a cero del eje leído, algunos ejes tendrán un doble juego de ruedas numeradas acompañado por un sistema de transmisión circular, que permite volcar el número en el segundo juego de ruedas numeradas al mismo tiempo que se lee el número del primero.
- c) El sistema de llevadas secuenciales (desde las unidades en adelante) de la máquina de diferencias fue pronto sustituido por un refinadísimo aparato capaz de registrar en un solo paso las llevadas necesarias tras una suma en cada nivel decimal, propagando todas las llevadas en el paso siguiente. Babbage llamó a este adelanto «aparato de llevadas por anticipado». En números de 40 cifras, este sistema puede acelerar hasta un 400 % las operaciones aritméticas.

Las principales diferencias con la máquina de diferencias estriban en la organización estructural y en los sistemas de control de la máquina analítica:

La estructura de la máquina de diferencias se basa en la distinción entre parte calculadora (ejes de diferencias) y parte impresora, sin embargo, la máquina analítica se estructura sobre la distinción entre *almacén y molino*¹⁴.

¹³ En esta época (hacia 1838) Babbage tenía proyectado que cada eje pudiera albergar cantidades de hasta 40 dígitos decimales.

¹⁴ Esta distinción es perfectamente paralela a la moderna separación entre unidad de proceso y unidad de almacenamiento de cualquier equipo informático.

En el *almacén*¹⁵ se introducen los valores iniciales de la fórmula que irán a parar al molino, luego este último devuelve los resultados calculados.

En el *molino*¹⁶ los números son operados aritméticamente según un patrón preestablecido por el sistema de control.

El sistema de control escogido era de doble nivel, ya que unos mecanismos implementaban los algoritmos necesarios para las cuatro operaciones básicas (control aritmético), mientras que otros controlaban la sucesión de las diferentes operaciones así como cuáles de los ejes del almacén había que leer o escribir en cada momento (control algebraico).

En los primeros momentos del proyecto, el mecanismo para ambos sistemas de control era del mismo tipo, el tambor y el aparato reductor. Análogo al mecanismo de las cajas de música, se distingue de este en que los tacos pueden atornillarse a mano para ser modificados y que ejercen su acción por el desplazamiento horizontal del tambor sobre una columna de palancas sensoras, por lo que, en ocasiones, el tamaño del taco puede ser un elemento adicional de control. La acción de cada palanca revertía en la disposición de diversas partes de la máquina analítica, entre estas se incluye el movimiento tanto circular como rectilíneo de los tambores.

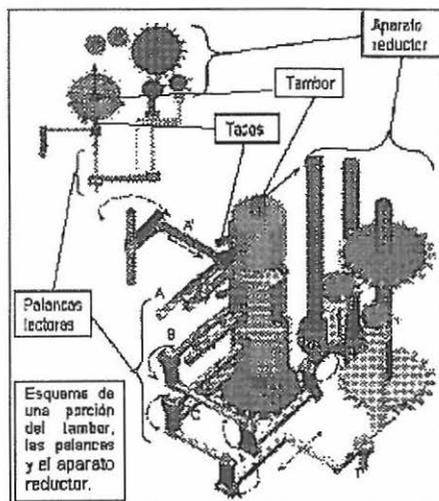
Del mismo modo, el propio tambor, gracias al aparato reductor que lo desplaza y las palancas lectoras, puede cambiar su acción en virtud de ciertos eventos predeterminados en el funcionamiento de cualquier

¹⁵ Hacia 1838 el almacén se componía de un número indefinido de ejes simples de ruedas numeradas todo ellos conectados a una cadena de transmisión de la que pueden desengranarse cuando sea conveniente.

¹⁶ El molino se disponía entorno a unos grandes engranajes o -ruedas centrales- que comunican todo el conjunto, y se componía básicamente de dos ejes numéricos (eje de cabeza y eje de cola) donde se operan las cantidades, estos están dotados de sendos mecanismos de llevadas por anticipado y pueden realizar cálculos independientes o bien operar simultáneamente con las dos partes de un número enorme. Además, sobre las ruedas centrales hay 9 ejes tabulares, donde alojar los 9 múltiplos de una cantidad al dividir o multiplicar, estos ejes disponen de transmisión circular para no perder la información al ser leídos y para mover sus posiciones decimales cuando convenga. El molino también tiene dos ejes numerados para comunicarlo con la cremallera de transmisión del almacén, llamados eje de salida y eje de ingreso, este último tiene un sistema de llevadas propio para generar los múltiplos en los ejes tabulares mediante sumas sucesivas. Además de algunos aparatos sensores y compradores de gran ayuda en la división y multiplicación, el molino también incluye el sistema de control aritmético, en forma de tres tambores de tacos con sus respectivos aparatos reductores.

parte de la máquina¹⁷. Esto proporciona una libertad algorítmica total, con recursividad y condicionalidad completas.

Sin embargo, a partir de 1836 Babbage, inspirado por el telar automático de Jacquard, relegó los tambores a la ejecución de las operaciones aritméticas e introdujo las tarjetas perforadas, tanto para el control algebraico como para la entrada, salida y almacenamiento de números. Las tarjetas tienen la ventaja de albergar una cantidad ilimitada de órdenes y son mucho más fáciles de manejar que los pesados tambores.



¹⁷ En el esquema podemos observar como se desplaza horizontalmente el tambor, desengranándose momentáneamente del aparato reductor para presionar el juego de palancas A B C (flecha bidireccional). Si nos fijamos con atención, advertiremos que la palanca A sólo puede ser movida si previamente se ha interpuesto ante ella y el tambor la palanca A' (flecha azul), esta palanca A' está conectada con otra parte de la máquina y funciona a modo de señalador condicional de un evento de la máquina. En el diagrama no hemos continuado el recorrido de la palanca A, se supone que desencadena algún tipo de acción en otra parte de la máquina engranando o desengranando la transmisión en un punto concreto. La acción de la palanca B (flecha roja) no está condicionada por ningún evento ajeno al tambor, su labor es la de engranar el sector S al aparato reductor, este sector hará girar el tambor una distancia angular determinada cuando sea engranado en la transmisión (flecha negra). La acción de la palanca C (flecha morada) es una mezcla de las dos anteriores, el taco T', que descansa libremente en un anillo, sólo hará su función (engranar el sector T en el aparato reductor) si el taco correspondiente del tambor lo coloca alineado bajo el sector T y otra pieza adicional señaladora de otro evento de la máquina, análoga a la palanca A', (que no hemos incluido en el esquema) lo empuja hacia arriba.

Se diseñaron varios tipos de tarjetas, cada una con su respectivo juego de palancas lectoras y prismas tractores; las encargadas del control algebraico eran básicamente de tres tipos: las tarjetas de variable, las tarjetas de operación y las tarjetas de combinatorias y de índice. Por otro lado hay tarjetas numéricas con las que introducir cantidades en el almacén de modo automático¹⁸, la máquina también podría perforar tarjetas numéricas como medio de almacenamiento externo.

Las tarjetas se presentaban unidas entre sí mediante hilos, el control algebraico necesitaba de dos cadenas de tarjetas relacionadas:

En primer lugar, tenemos una cadena de tarjetas de operación (cada una simboliza una suma, resta, multiplicación o división) en la que (si procede) se han intercalado las tarjetas combinatorias y de índice (estas controlan el prisma tractor de la cadena) necesarias para la ejecución de los bucles previstos en el algoritmo a seguir.

En segundo lugar, hay otra cadena en la que se presentan las tarjetas de variable que hacen referencia a las columnas del almacén implicadas en cada operación sucesiva ordenada por las otras tarjetas.

No han de confundirse los dos tipos principales de tarjetas (operación y variable)¹⁹ con los dos campos típicos de las instrucciones en

¹⁸ Cada tarjeta numerada tiene 9 filas y 41 columnas, cada columna representa un dígito del número, excepto la última, que es el signo algebraico. Cada dígito se representa por el número de agujeros en la columna correspondiente, de modo que se desperdicia bastante capacidad de almacenamiento, pero por el contrario el sistema de lectura, en base decimal, es proporcionalmente más eficiente.

¹⁹ Obviamente, Babbage no poseía el concepto de dirección de memoria variable, ni podía plantearse la posibilidad de calcular automáticamente la localización en el almacén de los números calculados. Esta separación entre el flujo de tarjetas de operación y de variable proviene de las concepciones de Babbage sobre las reglas que ha de seguir toda notación matemática, así, en su principal artículo sobre notación matemática (Babbage 1827), señala lo siguiente sobre la necesaria separación entre los signos de cantidad y de operación:

«En el análisis hay dos grandes tipos de símbolos, los que denotan cantidad y los que indican operaciones. Estos últimos eran todos ellos marcas arbitrarias en su origen, como las empleadas para expresar adición, multiplicación, etc. En el momento presente, sin embargo, se emplean frecuentemente letras para significar operaciones; y de aquí proviene ocasionalmente una fuente, si no de error, sí de inconveniencia (...) con el propósito de permitir más amplia elección en la selección de las letras, propondríamos la siguiente regla general: todas las letras que denotan cantidad han de escribirse en itálica, pero las que indican operación en caracteres normales.»

Esta rigidez en la localización de los números almacenados le acarrearía graves complicaciones en la disposición de las tarjetas de variable, pero no cabe duda de que

código máquina de los ordenadores digitales del siglo XX (operación y operando), sino que son instrucciones separadas, ya que los movimientos y bucles de ambos conjuntos son independientes y se implementan mediante mecanismos separados.

La dificultad de disponer ambos juegos de tarjetas para cálculos complejos debía ser considerable, pero aún así permite una generalidad matemática bastante grande.

Antes de pasar al detalle de las operaciones aritméticas, veamos como proyectaba Babbage la disposición de las tarjetas de operación y variable para la ejecución de una fórmula simple:

Para el ejemplo de ecuación de dos incógnitas de primer grado

$$\begin{aligned} mx + ny &= d \\ m'x + n'y &= d' \end{aligned}$$

podemos despejar así:

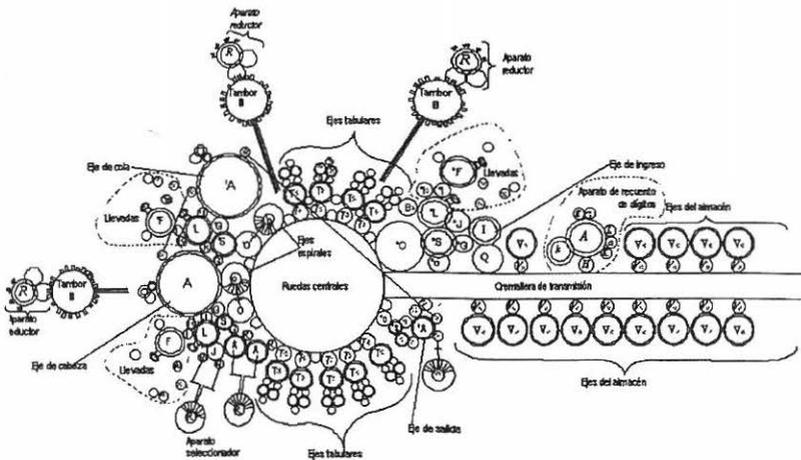
Para calcular el valor de x , primero tenemos que introducir en los ejes numerados V_n del almacén el valor de los números representados por m, n, d, m', n', d', n y n' , lo que implica que $V_0=m, V_1=n, V_2=d, V_3=m', V_4=n', V_5=d', V_6=n, V_7=n'$.

Para disponer las cadenas de tarjetas Babbage se ayudaba de este tipo de tablas:

Número de las operac.	Tarjetas de operación Símbolos indicativos de la naturaleza de las operac.	Tarjetas de variable		Curso de las operaciones en el almacén
		Ejes del almacén en que se realizan las operaciones	Ejes del almacén que reciben el resultado de las operac.	
1	x	$V_2 x V_4 =$	$V_8 \dots\dots$	$= dn'$
2	x	$V_5 x V_1 =$	$V_9 \dots\dots$	$= d'n$
3	x	$V_4 x V_0 =$	$V_{10} \dots\dots$	$= n'm$
4	x	$V_1 x V_3 =$	$V_{11} \dots\dots$	$= nm'$
5	-	$V_8 - V_9 =$	$V_{12} \dots\dots$	$= dn' - d'n$
6	-	$V_{10} - V_{11} =$	$V_{13} \dots\dots$	$= n'm - nm'$
		V_{12}		$dn' - d'n$
7	:	$\frac{V_{12}}{V_{13}} =$	$V_{14} \dots\dots$	$= x = \frac{dn' - d'n}{n'm - nm'}$

Con esta disposición de tarjetas, la máquina arrojaría, en su séptimo ciclo, el valor de la incógnita x en la columna del almacén número 14.

Para entender el funcionamiento aritmético del molino, hemos de familiarizarnos primero con la planta de la máquina analítica, para ello he preparado el siguiente esquema a partir del plano número 25 preparado por Babbage, donde el lector encontrará los elementos del molino y almacén que hemos mencionado:



Al pasar por el lector una tarjeta de suma o resta, el número almacenado en el eje V_n indicado por la tarjeta de variable correspondiente es volcado sobre el eje de ingreso I, desde aquí el operando es enviado mediante las ruedas centrales al eje de cabeza A, donde es sumado o restado al número que allí hubiera almacenado. Aquí surge la dificultad de que el aparato de llevadas no puede ser usado indistintamente para la suma o para la resta²⁰, esto es solucionado conectando el eje A con los dos aparatos de llevadas F y 'F de manera que

la falta de práctica en programación tuvo mucho que ver con ello; de haber podido montar una máquina analítica completa, sus ideas hubiesen, sin duda, evolucionado hacia algún sistema de direccionamiento automático de los números en el almacén.

²⁰ Babbage asociaba dos signos a cada número: el signo algebraico es el signo asociado a la variable en la fórmula general del resultado, especificada por una orden de sumar (+) o restar (-) en la tarjeta de operación, el signo accidental, por el contrario, es el signo que tiene el valor de la variable en cada momento como resultado de las operaciones a las que va siendo sometido, este último está representado por la última rueda numerada del eje donde se almacena u opera dicho número.

'F efectúa las llevadas de las sumas en A, mientras que F hace las llevadas de las restas. Si el resultado parcial se ha de almacenar, es enviado desde el eje de cabeza A hasta el eje de salida "A, desde donde se envía a su eje de almacén correspondiente indicado en la tarjeta de variable.

A pesar de que este proceso de suma en cuatro pasos parece muy lento y embrollado, Babbage había propuesto que la máquina hiciera simultáneamente los cuatro diferentes pasos de los sucesivos operandos, por un método de aceleración parangonable al actual «pipeline»:

Mientras el primer valor sumado se devuelve al almacén, el siguiente resultado se introduce en el eje de salida "A, al mismo tiempo los ejes de cabeza y cola se encuentran sumando el próximo resultado mientras el eje de ingreso I esta recibiendo el próximo operando.

Quando pasa una tarjeta de operación indicando la multiplicación, los ejes Vn del almacén implicados por las tarjetas de variable correspondientes vuelcan sus números hacia el molino por la cremallera y el eje de ingreso I, los dos factores quedan almacenados en los ejes de cabeza y cola A y 'A, donde se comparan. El menor se almacena en el eje de salida "A, desde donde será usado como multiplicador, con el multiplicando se genera, una tabla de múltiplos en los ejes tabulares T1-T9 mediante sumas sucesivas realizadas directamente sobre el eje de ingreso.

La multiplicación comienza por el dígito de las unidades del multiplicador, en virtud de este número el aparato seleccionador elige el múltiplo Tn correspondiente del multiplicando, que es sumado en los ejes A y 'A de cabeza y cola (que se encuentran engranados entre sí para albergar un número de longitud doble) realizando las llevadas²¹ si las hubiere, a continuación se mueven las posiciones decimales de los ejes de tabla Tn y se reinicia el proceso con las decenas del multiplicador²², Finalmente, el producto se envía a la columna del almacén fijada por la tarjeta de variable.

²¹ Según Bromley, este algoritmo de multiplicación fue lo que impulsó a Babbage a crear el sistema de llevadas por anticipado, lo que condujo a la separación funcional de molino y almacén, (almacenamiento y proceso) que no surge en los ordenadores modernos hasta la intervención de Von Neumann

²² Hay un mecanismo especial O y O', controlado por los ejes espirales O y O', que se encarga de que al eje de cabeza y al de cola les lleguen desde las ruedas centrales los dígitos de cada producto parcial sucesivo en su posición decimal correcta.

La primera parte de la división es análoga a la multiplicación, se realiza la tabla de los múltiplos del divisor y el dividendo se coloca en los ejes de cabeza y cola engranados. En cada paso de la división se comparan, mediante el aparato seleccionador, los dos dígitos más altos del resto con los dos dígitos más altos de cada múltiplo del divisor para poder estimar cual es el siguiente dígito del cociente, entonces se resta el múltiplo del divisor indicado por el dígito del cociente del resto, si el resultado es negativo la estimación era incorrecta, y la máquina sumará la cantidad restada y lo intentará con el siguiente menor divisor. El cociente es ensamblado dígito a dígito (paso a paso) en el eje de salida "A, y finalmente enviado al eje correspondiente del almacén.

ALGUNAS POSIBLES CAUSAS DEL RETRASO EN LA DIFUSIÓN DEL CÁLCULO AUTOMÁTICO

Tradicionalmente, se ha contemplado el retardo en la construcción y uso masivo de los ordenadores como el producto de un desajuste entre las habilidades mecánicas disponibles en la época de Babbage y la complejidad del diseño de su máquina analítica. Actualmente, tras tres décadas de estudios históricos serios sobre la vida y la obra de Babbage²³, se barajan hipótesis muy diferentes.

En primer lugar, la máquina analítica surge tras un tortuoso y fallido intento de construcción, financiado por el gobierno británico, de una máquina calculadora automática menos ambiciosa: la máquina de diferencias número uno, en la que trabajó entre 1822 y 1833,

El fracaso de este primer proyecto no se debió a problemas técnicos sino de otro tipo; para su construcción en el taller del ingeniero Joseph Clement, se desarrolló el primer equipamiento completo de máquina-herramienta de precisión, y los resultados fueron mejores de lo que era necesario²⁴, hasta el punto que los avances en este terreno fueron definitivos en la automatización y mecanización de todo tipo de procesos durante la segunda revolución industrial. Esto queda atestigua-

²³ ASPRAY, BROMLEY, CAMPBELL-KELLY, CERUZZI, WILLIAMS (1990), WILKES (1981), WILKES (1990), WILKES (1991), BROMLEY (1982), BROMLEY (1987), FRANKSEN (1981), FRANKSEN (1991), HYMAN (1982), HYMAN (1996), COLLIER (1990), DUBBEY (1978), DUBBEY (1979), GRATTAN-GUINNESS (1989), GRATTAN-GUINNESS (1992), KATZ (1982), HILTS (1978), CAMPBELL-KELLY (1994), RANDELL (1982).

²⁴ BROMLEY (1987).

do por el perfecto funcionamiento que conserva, 166 años después de su construcción, la porción de dicha máquina que se puede contemplar en el South Kensington Science Museum de Londres, reputada como la mejor obra de ingeniería de precisión de su época.

El desajuste no es, por tanto, entre la estructura mecánica del invento y las habilidades técnicas de la época, en otro sentido, hay motivos para creer que el trabajo de Babbage sobre la máquina analítica no estaba dirigido a la construcción inmediata, sino que se trataba de una investigación experimental de tipo preliminar sobre las diferentes posibilidades en el diseño de una calculadora mecánica completamente programable. De hecho, cuando acometió el primer impulso al proyecto de máquina analítica –1834– los trabajos en la máquina de diferencias habían estado interrumpidos durante un año por problemas de dinero con Clement, pero el gobierno, que no dedicó más fondos para continuar la máquina, tampoco cerró ese primer proyecto hasta finales de 1842, cuando, tras seis años de infructuosos intentos por parte de Babbage para forzar una decisión administrativa, el ministerio de hacienda dio por definitivamente perdidas las 17.000 libras invertidas hasta entonces en la máquina de diferencias.

Esto quiere decir que, durante los seis primeros años de evolución de los diseños y experimentos acerca de la máquina analítica, a lo largo de los cuales se desarrollaron sus principales características, Babbage estaba oficialmente adscrito al paralizado proyecto de la máquina de diferencias.

Toda la obra de los delineantes y trabajadores implicados en la construcción de planos y mecanismos experimentales para la máquina analítica se llevó a cabo en las dependencias de la casa de Babbage, a cuenta de su propia fortuna. Desde un punto de vista psicológico, los motivos de Babbage para trabajar en la máquina analítica descansaban en el mero interés científico personal, fuera de otro tipo de responsabilidades; desde un punto de vista institucional, era un proyecto completamente autónomo.

Así, parece a primera vista que el desajuste causante del retraso en la implantación social del cálculo automático es de tipo organizativo:

La complejidad de la estructura mecánica del invento podría requerir un determinado nivel de jerarquización y organización social, tanto en el equipo encargado como en el mismo proceso de producción, que no se alcanzaba en los talleres mecánicos de la primera mitad del siglo

XIX –y que no se alcanzó hasta que los esfuerzos militares de coordinación interdisciplinar de la investigación durante y tras la segunda guerra mundial formaron el embrión de los modernos programas de investigación científica–.

Con esta hipótesis se explicaría tanto el fracaso de la construcción de la máquina de diferencias como la ausencia de proyectos de construcción de alguna máquina analítica. Desgraciadamente, la respuesta no es tan sencilla ni tan elegante, ya que excluye la posibilidad de que en esta época se hubiesen construido máquinas calculadoras de alta complejidad; como veremos más adelante con cierto detalle, en la segunda mitad del XIX, los autodidactos suecos Georg y Edvard Scheutz, construyen y venden dos máquinas de diferencias inspiradas en la primera máquina de Babbage, aunque ninguna de las dos fue mínimamente utilizada.

Es necesario profundizar en la investigación histórica sobre la vida y la obra de Babbage para desentrañar la naturaleza de los problemas que le impidieron la construcción de una máquina analítica en su época. Para ello, se dispone de una edición bastante completa de sus obras, así como de diversas interpretaciones históricas profundamente fundamentadas sobre su vida y su obra:

Hay, actualmente, dos opciones principales en la historiografía del tema, por un lado los autores que, de un modo humanístico, prestan atención a la historia social, política y psicológica del proceso –con A. Hyman²⁵ a la cabeza– y quienes, con una visión más filosófica y matemática, se centran en la historia epistémica o conceptual –por ejemplo I. Grattan-Guinness²⁶– en la que se inserta Babbage y su obra.

No es de extrañar esta división, ya que la obra de Babbage se extiende mucho más allá de las calculadoras automáticas, y abarca desde los análisis matemáticos sobre las propiedades más abstractas del álgebra funcional²⁷, hasta la geología²⁸, la economía de la tecnología²⁹, la política científica³⁰ y la teología natural³¹. Todo ello, publicado o pre-

²⁵ HYMAN (1982), HYMAN (1996).

²⁶ GRATTAN-GUINNESS (1992).

²⁷ BABBAGE (1813), BABBAGE (1815), BABBAGE (1816), BABBAGE (1816a), BABBAGE (1817).

²⁸ BABBAGE (1847).

²⁹ BABBAGE (1833).

³⁰ BABBAGE (1830a).

³¹ BABBAGE (1837).

parado por Babbage durante su vida, esta acompañado por un gigantesco catálogo de manuscritos y notas de trabajo, esquemas, notaciones y planos de la máquina analítica, que permanece a disposición de los investigadores en la biblioteca del museo de la ciencia de South Kensington, Londres. Por último, hay que añadir a todo esto una de las más impresionantes colecciones epistolares de la biblioteca británica, tanto por el volumen como por la variedad y relevancia de los personajes implicados. La abundancia de los materiales con que trabajar hace que, necesariamente, cada estudioso seleccione un tema específico, según su preparación e intenciones:

Quienes prefieren los temas humanos y sociales de la historia de la ciencia, tienen mucho material para investigar en los tratados escritos por Babbage acerca de política científica, economía industrial, principios de fiscalidad. Además, sus memorias³² y sus cartas³³ ofrecen un campo inagotable sobre su vida personal, su actividad política, sus viajes y relaciones con la comunidad científica y los notables de toda Europa.

Los que, por el contrario, prefieren los asuntos epistémicos y metodológicos en la historia del conocimiento, pueden bucear a placer entre los abundantes artículos sobre muy diversos temas de matemáticas que Babbage publicó en vida; por si esto fuera poco, también dejó publicaciones sobre metodología de las matemáticas, de la mecánica, filosofía y metodología de la invención³⁴, notación matemática³⁵ y mecánica³⁶, e incluso aplicó 'metáforas computacionales'³⁷ a la teología natural.

³² BABBAGE (1864).

³³ La correspondencia recibida por Babbage se conserva en la British Library.

³⁴ Por ejemplo, en BABBAGE (1833, cap. XXVII, y también cap. XXXV).

³⁵ BABBAGE (1827), BABBAGE (1830), BABBAGE (1817b).

³⁶ BABBAGE, (1826a), BABBAGE, (1851).

³⁷ BABBAGE (1837). El argumento de Babbage se refiere a la naturaleza de los milagros en relación con las leyes de la naturaleza: del mismo modo que la máquina calculadora puede disponerse de antemano para ejecutar una o varias funciones sucesivas en intervalos definidos, sin que sea necesaria ninguna intervención ulterior sobre su mecanismo, el creador del mundo pudo preestablecer una armonía de leyes naturales, algunas continuas, otras cambiantes en diferentes sucesiones, y los cambios bruscos de comportamiento que se observan en todo tipo de fenómenos naturales no necesitan del sustento ni de la participación ocasional de su creador.

DOS CAMINOS DE ARGUMENTACIÓN HISTÓRICA: UNA MÉTAFORA

Aunque no es el objetivo de este trabajo describir con detalle estos dos caminos argumentativos, intentaremos ilustrarlos de manera metafórica a modo de senderos que surcan un paisaje: uno parte de la investigación de los valores y relaciones sociales y microsociales de los actores implicados en la historia; el otro tiene como origen la evaluación teórica de la singular práctica científica de Babbage.

El primero transcurre holgadamente por los suaves valles de la descripción y narración de los diferentes documentos que se han conservado, mientras que el último camina a grandes saltos por los agudos riscos de la exégesis metacientífica, buscando pruebas e indicios de los valores epistémicos y cognitivos que guiaron el extraordinario recorrido intelectual de Babbage.

Finalmente, el primer camino encuentra su destino en las verdes y prósperas vegas de la explicación sociocientífica y sociopolítica, donde se pinta un vivo y colorido retrato en el que Babbage aparece como un ilustrado reformista moderadamente radical, de ética utilitarista; como un hombre con sus aversiones y afectos, cargado por su gran genio y su intensa historia personal. Por contra, el último recalca en una cumbre teórica más alta y fría, desde donde se contempla todo el paisaje a vista de pájaro, desde allí se divisa, por así decirlo, un mapa epistémico de Babbage con el perfil de un matemático algebraico inclinado hacia la semiótica, con fuertes intereses en la precisión y el análisis algorítmico de procesos iterativos y recursivos.

UN DILEMA

A primera vista, estas dos rutas explicativas pueden parecer naturalmente complementarias, es decir, que transcurren a lo largo de un mismo paisaje por diferentes senderos. Esta imagen idílica se ve desmentida en cuanto se intenta dar cuenta de incógnitas históricas concretas, ya que ambos recorridos proporcionan hipótesis explicativas distintas, indicio claro de que transcurren por paisajes distintos. Ante estas discrepancias, lo que suelen hacer los historiadores de la ciencia es optar, según su criterio individual, por la explicación más plausible.

Como las preguntas que originan discrepancias no son las menos importantes –la duda capital versa sobre las causas del fracaso de las

calculadoras de Babbage-, cabría preguntarse por la legitimidad de fundamentar el juicio histórico en la sensación de verosimilitud.

Con la máxima probabilidad, al elegir entre ambas opciones no se añade información sobre la historia o las causas de su desenlace, sino sobre los valores epistémicos que guían la investigación –y probablemente la visión del mundo– del historiador implicado en el juicio.

Ante este dilema, propondremos una alternativa sintética, donde las diferentes explicaciones disponibles no se consideran como diferentes recorridos sobre un paisaje dado, sino como las diferentes componentes que describen el comportamiento de una función de mayor complejidad.

En otras palabras, los diferentes principios en que se sustentan ambos marcos explicativos pueden considerarse como los diferentes orígenes o ejes ortogonales de una función cuya dimensión geométrica esta por determinar. Este planteamiento debería permitir una contribución entre todos los esfuerzos de investigación histórica y una mayor definición de las incógnitas y los problemas a investigar en pro de una caracterización más completa de los interrogantes principales. Por otro lado, tendrá la ventaja añadida de dejar una puerta teórica siempre abierta a nuevas investigaciones que puedan revelar componentes desconocidas en el problema.

Para simplificar, respecto de las causas del fracaso de las máquinas calculadoras, se puede ver la siguiente discrepancia en los historiadores:

Los que se decantan por las dimensiones sociales, políticas y afectivas del problema atribuyen el fracaso del proyecto gubernamental de la primera máquina de diferencias a un entramado de actores y relaciones definido por tres racimos principales: la inestabilidad política del segundo tercio del s. XIX, las malas relaciones de Babbage con Clement –el ingeniero encargado del taller– y el estado de ánimo producido por desgracias en la familia de Babbage.

En cuanto a los fracasos de la máquina analítica y de la segunda máquina de diferencias, suelen explicarse, desde este punto de vista, por una falta de voluntad, por parte del propio Babbage, de realizar un auténtico proyecto de construcción. Esta falta de decisión estaría sobradamente justificada por la mala experiencia durante el proyecto de la primera máquina de diferencias.

Quienes prefieren la caracterización metateórica, argumentan que el fracaso proviene de un error conceptual del propio Babbage, quien, obsesionado con los valores epistémicos de la precisión y la potencia de cálculo –muy propios de un analítico algorítmico y algebraico–, olvidó optimizar económicamente el proceso de producción de sus calculadoras, lo que hizo inviable la producción de la máquina: a cambio, en el taller de la máquina de diferencias, Clement desarrolló los sólidos cimientos de la industria de la máquina-herramienta de precisión, que daría lugar al tremendo auge tecnológico del final del siglo XIX.

Como fundamento, se traen a colación datos provenientes de estudios de historia de la ingeniería³⁸, en los que se demuestra que las exigencias en cuanto a las tolerancias en la producción de las piezas de la máquina de diferencias eran demasiado altas, lo que encarecía innecesariamente la producción, y, por otro lado, no se habían tenido en cuenta las cuestiones cinemáticas y de consumo de energía al diseñar la máquina. A expensas de maximizar el gasto, se pretendía obtener una calidad absoluta, lo que no deja de ser un objetivo utópico, tanto más si el mecenas es el gobierno y no había un consenso amplio sobre la utilidad pública del proyecto.

Se pueden aducir hechos –y no impresiones de verosimilitud– a favor de la interpretación metateórica, entre otras cosas, el relativo éxito de las máquinas de diferencias suecas, fabricadas con menos constricciones de potencia y precisión, aunque bajo los principios generales sentados por Babbage.

Ahora bien, también hay hechos en contra, como, por ejemplo, la larga tarea –recogida por Babbage en sus extensos cuadernos de trabajo– de simplificación de los mecanismos proyectados mediante la notación mecánica, los intentos de conjugar la potencia de cálculo con un número mínimo de componentes y el exhaustivo repaso de todos los planes mecánicos y lógicos posibles a la hora de construir una máquina analítica.

Otro punto en contra, que no ha sido tratado debidamente por quienes defienden la inviabilidad económico-industrial del proyecto, es la aparente paradoja de que Babbage fracasase como un novato por desconocer los detalles de la ingeniería comercial, tras haber escrito un pio-

³⁸ BROMLEY (1982).

nero manual de economía de procesos de producción industrial, declarado hoy en día como el estudio precursor de los métodos de optimización mediante investigación operativa³⁹; en este tratado se formula toda una doctrina sobre las ventajas económicas de la colaboración entre la ciencia y las técnicas de manufactura y producción basada en una amplísima investigación empírica de los métodos y procesos industriales de la época.

Por contra, el estudio de los cuadernos de trabajo de la máquina analítica⁴⁰ –los cuales constituyen una parte principal del material empírico sobre esta historia– revela una especie de afán teórico en el transcurso del proyecto de la máquina analítica, que muy bien podría abonar la hipótesis sobre el desdén de Babbage por la fabricación directa:

A pesar de que empleaba a mecánicos y delineantes, parece que, en lo que se refiere a la máquina analítica, recurría a ellos para comprobar cada innovación mecánica, pero el trabajo principal se realizaba de manera conceptual y matemática, con ayuda de fórmulas, esquemas y la notación mecánica, explorando formalmente las diferentes posibilidades para cada función e intentando eliminar las redundancias y las incompatibilidades, más al modo de una investigación científica –lógica o algebraica– que de un proyecto industrial.

El dilema puede resumirse así: *O bien la máquina analítica estaba mal concebida por ser demasiado cara y compleja como para ser financiada en su época, o bien las contingencias sociales, económicas, políticas y psicológicas impidieron su construcción.*

Lo que parece implicar este otro dilema contrafáctico relacionado: *O bien la máquina analítica se podría haber construido –con bajos costes– tras una optimización para simplificar el proceso de producción, o bien se podría haber construido en su forma original –a un coste alto– si se hubieran dado las condiciones históricas propicias.*

Lo paradójico del caso es que encontramos hechos que contradicen ambos términos del dilema, lo que es una señal clara de un planteamiento erróneo de la cuestión, desde el punto de vista multidimensional expuesto arriba, deberíamos decir que falta al menos una

³⁹ BABBAGE (1833).

⁴⁰ Una voluminosa colección (más de 5.000 páginas manuscritas) que se encuentra a disposición del público en la biblioteca del museo de la ciencia de South Kensington, Londres.

componente de la función, pero antes de localizarla veamos algunos ejemplos.

Por ejemplo, en la correspondencia de George Bidell Airy, a la sazón *Astronomer Royal*, encontramos que, hacia 1840, un tal Thomas Fowler comunica haber construido una calculadora automática muy simple y eficaz que usaba una peculiar notación numérica en base ternaria.

Según dice el propio Fowler, consiguió demostrar su máquina ante Babbage, Francis Baily y Augustus de Morgan, quienes quedaron muy favorablemente impresionados. A pesar de que Airy promocionó personalmente la calculadora de Fowler para su uso experimental en la recaudación de impuestos de Devonshire, tras la fallida experiencia con la máquina de Babbage, las diferentes instancias de los ministerios competentes no quisieron tener ninguna experiencia con máquinas calculadoras, por muy baratas que fuesen.

Con este ejemplo, la primera parte del dilema está negada: si Babbage pudo apreciar las ventajas en simplificación que ofrecía la notación ternaria de Fowler, y tenía alguna intención de legar al mundo una máquina analítica en funcionamiento, parece absurdo que no se encuentre referencia alguna a Fowler en todos los escritos de Babbage –a quien la envidia no afectaba, como se sabe por la buena relación con los suecos Scheutz– ni tampoco se haya encontrado efecto alguno de influencia en sus diseños, al contrario, aunque evaluó la posibilidad de usar otras bases, Babbage nunca se apartó del sistema decimal, e incluso preparó a la máquina analítica para el uso de complementos.

Aun más, el hecho de que Fowler también fracasase ante el gobierno, con el apoyo del propio Airy, con una máquina preparada y en funcionamiento, niega completamente la posibilidad financiación gubernamental de una máquina analítica simplificada.

Sin embargo, el segundo término del dilema, que se refiere a las contingencias sociales, psicológicas y políticas adversas, solo es atribuible o verdadero, dada la modestia económica y la neutralidad política de la propuesta de Airy y Fowler (quienes, de hecho, pretendían ahorrar dinero al contribuyente), en lo que respecta al hipotético impacto psicológico que pudiera haber causado en la clase dirigente el recuerdo del fracaso, en un proyecto más ambicioso, de un genio tan evidente como Babbage.

El atribuir al fracaso de Babbage la responsabilidad del retardo histórico en la popularización del cálculo automático no puede ser, por motivos evidentes, un argumento en la discusión sobre ese mismo fracaso. Por otro lado, los traumas psicológicos de los altos funcionarios no constituyen más que conjeturas históricas sin valor documental.

No parece tampoco permisible achacar el fracaso en la aplicación de la máquina de Fowler a la inestabilidad política —ya que era un proyecto a corto plazo—, a la falta de apoyos —Airy y la aquiescencia más o menos declarada de Babbage deberían haber bastado—, ni tampoco a la escasez económica, pues, como hemos dicho, era un proyecto barato y rentable desde el principio.

Encontramos en este caso indicios para sospechar que, a pesar de que se hubieran dado las condiciones políticas, económicas, sociales y psicológicas adecuadas, no se habría construido una máquina analítica como las proyectadas por Babbage, ni siquiera tras optimizar el proceso de producción al máximo. Lo máximo que se hubiera conseguido es, quizás, producir una máquina de diferencias más o menos eficaz, que, con toda probabilidad, no hubiera rendido a la ciencia casi ninguna ayuda, como sucedió con la máquina de diferencias sueca.

En definitiva, aún satisfaciendo ambos términos del dilema parecen faltar condiciones para la construcción de la máquina analítica: falta al menos una dimensión en el tratamiento de la cuestión. Antes de buscar estas condiciones incógnitas, tenemos que asegurar la insuficiencia del dilema con otros tres casos históricos relacionados.

TRES EJEMPLOS

Los juicios contrafácticos como estos nunca son seguros, pues tienen en contra la esencial contingencia de los sucesos históricos, sin embargo, podemos juzgar la probabilidad de los últimos asertos mediante la comparación con el fracaso paralelo de otras invenciones equivalentes a la de Babbage durante la segunda mitad del siglo XIX y los inicios del XX.

*Las máquinas de diferencias suecas*⁴¹

El primer caso es, sin duda, el más importante, ya que el propio Babbage esta muy implicado en el mismo, por ello lo discutiremos con algo más de detalle. Se trata de las máquinas de diferencias construidas por los suecos Georg y Edvard Scheutz (padre e hijo) entre 1837 y 1869. Estos, inspirados por las noticias del proyecto de la máquina de diferencias de Babbage que llegaban a Suecia mediante revistas de divulgación como *The Edimburg Review* o el *Mechanics Magazine*, se propusieron adelantar al genio, simplificando y mejorando tanto el diseño como los métodos de producción necesarios para la construcción de la máquina.

A pesar de que el proyecto original presentado ante la academia de ciencias sueca en 1837 era correcto, fácilmente construible a medio plazo y relativamente barato, esta lo rechaza en primera instancia, alegando falta de originalidad. Padre e hijo siguieron trabajando en el proyecto con sus propios fondos y herramientas (un torno simple de pedal, sin montura para elementos de corte), con lo que, al final del verano de 1843 pudieron terminar un prototipo totalmente funcional, aunque de solo cinco dígitos y tres diferencias.

Tras obtener un certificado de corrección de eminentes científicos, los Scheutz solicitaron de nuevo al gobierno sueco una beca de 10000 riksdaler (825 libras, pura calderilla comparado con las decenas de miles gastadas en la máquina de diferencias) para construir una máquina de diferencias a gran escala, petición que fue otra vez denegada a finales de 1844.

En 1851 Georg Scheutz escribe una carta al propio Rey Oscar pidiendo esta vez 3333 riksdaler para elaborar no ya una máquina a gran escala, sino un prototipo lo suficientemente completo como para guiar futuras investigaciones. A pesar de todo, la corona se vuelve a negar, alegando falta de fondos.

La tan ansiada financiación tuvo que esperar al año siguiente, a la moción que Magnus Brinck, un político radical del estamento burgués elevó ante el Riksdag, en la que proponía a los representantes de los otros tres estamentos (clérigos, nobles y trabajadores manuales) un acuerdo de consenso para recaudar los 3333 riksdaler de los que tan

⁴¹ La información de esta sección proviene fundamentalmente de LINDGREN (1990).

lamentablemente carecía el Rey Oscar. Tras el éxito de Brinck, Oscar autorizó la entrega del dinero a la Real Academia de Ciencias para la financiación y supervisión del proyecto, que se desarrolló óptimamente.

En octubre de 1853 estaba terminada la segunda máquina de diferencias de los Scheutz, esta podía calcular e imprimir tablas de cuatro diferencias con números de 15 dígitos. Tanto el comité evaluador como los ministros y el propio Rey quedaron tan complacidos que no consideraron a la máquina como un prototipo, sino como un resultado definitivo, y no aceptaron acometer la empresa de producción y comercialización a gran escala de máquinas de diferencias, a cambio, ofrecían a los inventores otra suma de 3.333 riksdaler a modo de compensación y recompensa por su excelente labor.

Decididos a sacar partido de su invención, los Scheutz consiguen vender a un conde inventor la exclusiva de los derechos de venta de la máquina a cambio de los gastos de promoción en Europa, patentes y gastos de traslado.

El 30 de Septiembre de 1854 los Scheutz llegan a Inglaterra con la máquina, la presentan ante la *Royal Society*, en la demostración estaban los ingenieros Donkin y Gravatt, y científicos de la talla de Faraday. Babbage, por su parte, les dio una calurosa bienvenida, les enseñó su casa, sus talleres, y mostró un gran interés por la máquina que traían los Scheutz.

El recibimiento fue tan bueno que dejaron la máquina al cuidado de Donkin y Gravatt en una habitación de la *Royal Society* mientras volvían a Estocolmo. Durante 1855, la máquina se hacía famosa sin necesidad de sus inventores: el príncipe Alberto presenció una demostración, el periódico *Illustrated London News* publica un artículo divulgativo, un hijo de Babbage realiza las notaciones mecánicas de la máquina sueca, y, finalmente, es trasladada a París durante el verano para la exposición universal.

El propio Babbage se trasladó allí en septiembre para presentar la notación mecánica completa de la máquina Scheutz, acompañada de un pequeño artículo, ante la *Academie des Sciences*; es destacable que, aunque se le impidió acceder al pabellón de exposiciones para mostrar las notaciones ante el público, se las arregló para hacer una demostración ante el jurado. Como resultado, la máquina obtuvo una medalla de oro.

Napoleón III ordenó que, tras la exposición, la máquina fuese trasladada al observatorio de París. Allí Leverrier, el director del observatorio, descubridor de Neptuno, emitió un informe que, aunque favorable, desaconsejaba su compra señalando lo excesivo del precio (50.000 francos, unas 2.000 libras).

Mientras tanto, los Scheutz descansan en Estocolmo hasta la primavera de 1856, durante ese invierno, el propio Babbage, busca entre sus amistades a un perfecto comprador para la máquina: Benjamin Althorp Gould parece la opción perfecta, conoció a Babbage durante la exposición universal de París y acababa de ser nombrado asesor científico del consejo del observatorio Dudley de Albany, Nueva York.

Tras unos meses de negociaciones, el 22 de diciembre de 1856 se cierra el trato por 1.000 libras, las cuales apenas valieron a los Scheutz para pagar los gastos de promoción que habían ido acumulando, ya que, por lo visto, el conde inventor que hacía de mecenas no cumplió su parte del trato.

Antes de enviar la máquina a América, los Scheutz aprovecharon para imprimir algunas tablas, las cuales fueron editadas con fines divulgativos, precedidas por un pequeño resumen de la historia de la máquina, la naturaleza de su mecanismo y su potencia matemática.

Tras su llegada a América, Gould estuvo hasta mayo de 1858 sin poderla hacer funcionar correctamente, y desgraciadamente, sólo tuvo tiempo de imprimir unas pocas tablas —que nunca fueron editadas— antes de su despido: los fideicomisarios juzgaron sumamente inusual y extraño que se invirtiese en una máquina que ni el gobierno de Francia ni el de Gran Bretaña quisieron comprar, y que, por añadidura, ni siquiera se podía hacer funcionar. Tras el despido la máquina dejó de ser utilizada.

Sea como fuere, tanto las tablas como la venta mejoraron mucho la imagen de los Scheutz ante el gobierno británico: en julio de 1857 se entrevistan con James George Graham, director de la oficina del registro civil, quien se muestra muy favorable a la compra de una máquina de diferencias con la misma potencia que la anterior (4 diferencias y 15 dígitos) por 1.200 libras. El ministro de hacienda remite la propuesta directamente a George Airy, quien a su vez emitió un informe bastante elaborado donde, tras repasar los pros y los contras del uso de estas máquinas, da su aprobación final. Esta última decisión fue notificada el 15 de noviembre de 1857.

A pesar de que el gobierno no adelantó más que 300 libras, la máquina pudo ser construida a tiempo en el taller de Donkin; en Junio de 1859 es enviada a la oficina del registro civil, pero enseguida comienza a fallar la impresora, y aún peor, la cuenta de Donkin asciende a 1.815 libras. Por suerte, ni el comité evaluador advirtió los fallos de impresión ni Donkin quiso reclamar su dinero, al contrario, anunció su propósito de producir más máquinas de ese tipo para resarcirse de las pérdidas.

En el registro civil no tardaron en advertir los errores de la máquina, la cual exigía una atención constante del operador para realizar los laboriosos ajustes pertinentes. En 1864 se publica la primera y única tabla calculada por esta máquina, la *English Life Table*, pero tras finalizar esta labor, la máquina fue guardada y nunca se volvió a usar. Ese mismo año, un nuevo director del observatorio Dudley de Albany hizo un nuevo intento para sacar partido de la segunda máquina Scheutz, pero tras funcionar esporádicamente durante un tiempo, la máquina volvió a quedar olvidada en algún almacén.

Edvard no consiguió ningún otro encargo de máquina de diferencias, y, tras la muerte de su padre en 1873, se dedicó a la ingeniería y la divulgación científica, siguiendo los pasos de su padre.

Moraleja

Aunque las máquinas de diferencias suecas nacieron con mejor estrella que la máquina de diferencias nº1, su destino final, abandonadas en oscuros sótanos, fue mucho menos glorioso que la vitrina del museo de la ciencia donde descansa esta última.

Acabamos de mostrar que, a pesar de la pericia empresarial de los Scheutz, quienes, además de optimizar el proceso de producción hasta hacerlo viable, habían realizado una ardua labor de comercialización y propaganda, no fue posible que sus máquinas de diferencias rindiesen el cometido que se les suponía ni en el campo de la ciencia, ni en el de la administración, y tampoco, por supuesto, ningún beneficio económico relevante.

Los Scheutz consiguieron vencer las resistencias políticas, los problemas tecnológicos e incluso las dificultades financieras, y aun así no consiguieron implantar la mecanización del cálculo en ninguno de los

ámbitos posibles de aplicación. ¿Cuál es, por tanto, la condición o condiciones que quedaron sin satisfacer? Antes de responder conviene una presentación somera de dos casos paralelos de fracaso en los inicios del siglo XX.

La máquina analítica de Ludgate

Ludgate escribió un artículo sobre la máquina analítica de Babbage hacia 1914, donde afirmaba haber diseñado una máquina analítica él mismo unos años antes, descrita en Ludgate (1909). Era un dispositivo mecánico, capaz de almacenar 192 números de 20 dígitos decimales y operar entre ellos aritméticamente de forma automática bajo el control de una cinta perforada o de un teclado. La mayor parte de sus diseños son originales, y por ello parece que supo de Babbage cuando su trabajo estaba muy adelantado. En lugar de usar columnas coaxiales de ruedas numeradas para almacenar las cifras, con sus complicados engranajes de comunicación, utiliza para cada número un bastidor cuadrado de cilindros deslizantes, montándolos todos en un cajetín giratorio discoidal, paralelamente a sus radios, de modo que girándolo se puede registrar o alterar la posición de los cilindros en cualquiera de los bastidores. El sistema aritmético es aún más ingenioso, para la multiplicación no utilizaba las tablas típicas de los aritmómetros al uso en la época, sino que simplificaba esta operación con los llamados «logaritmos irlandeses», unas tablas que permiten convertir en índices las cifras del multiplicando y el multiplicador reduciendo la multiplicación a la suma:

Unidad:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Índice simple:	'50'	'0'	'1'	'7'	'2'	'23'	'8'	'33'	'3'	'14'				
Índice comp.:	'0'	'1'	'2'	'3'	'4'	'5'	'6'	'7'	'8'	...	'56'	'57'	'58'	...
Producto parc.:	1	2	4	8	16	32	64	3	6	...	35	0	0	...
Ejemplo: 5×7 a '23' + '33' = '56' a 35														

Por otra parte, el sistema para la división era igualmente innovador, en lugar de los métodos de tanteo tradicionales, propone una aproximación directa mediante series, lo más novedoso es que propo-

ne presentarlo a la máquina como una subrutina instalada, usando para implementarla la superficie perforada de un cilindro metálico rotativo como memoria de sólo lectura.

Por último, el sistema de control secuencial era una simplificación eficaz del de Babbage, una cinta perforada en la que cada línea representaba un código para la operación, dos direcciones para los operandos y una o dos direcciones para el resultado, este último avance prefigura el funcionamiento de máquinas muy posteriores como el Mark I. Ludgate tenía en común con Babbage la preocupación por la posibilidad del uso de los condicionales y los bucles, pudiéndose recorrer segmentos de la cinta hacia delante o hacia atrás sin leerlos en función de los resultados del cálculo.

Pero la diferencia más importante es que la máquina de Ludgate iba a ser portátil, ocupando un volumen de 1.6 metros cúbicos.

Moraleja

En cuanto al propio Ludgate, parece ser que fue contable, y dedicaba sus ratos libres a la construcción de sus máquinas. No alcanzó ni buscó ninguna fama durante su época, y no hizo, que se sepa, ningún intento de comercializar o difundir la máquina.

Por esta razón, desgraciadamente, se tiene muy poco conocimiento de su vida y sus motivaciones respecto de las máquinas, aunque todo parece indicar que no pasaba de ser el entretenimiento de una personalidad genial y sin ambiciones.

Por otro lado, es probable que Ludgate, como Babbage y tantos otros antes, conociera los beneficios que pueden derivarse de la difusión del cálculo automático, en caso contrario no habría tenido razón alguna para publicar en la prensa científica los nuevos principios del funcionamiento de su máquina. La única ilustración que disponemos de su talante al respecto es el párrafo final del artículo en el que presenta los principios de su proyectada máquina:

«...the very numerous branches of pure and applied science which are dependent for their development, record or application on the prominent science of mathematics, there is not one of which the progress would not be accelerated, and the pursuit would not be facilitated, by the complete command over the numerical expressions,

and the relief from the time-consuming drudgery of computation, which the scientist would secure through the existence of machinery capable of performing the most tedious and complex calculations with expedition, automatism, and precision»⁴².

Para comprender este ejemplo, es necesario evaluar antes el de una personalidad integrada muy profundamente en el mundo de la ciencia y la tecnología de principios del XIX.

Torres Quevedo

Este tercer ejemplo versa sobre un «sabio» santanderino⁴³, contemporáneo de Ludgate y también buen conocedor de Babbage:

La principal motivación de Torres Quevedo era mostrar las posibilidades de las nuevas técnicas electromecánicas en los autómatas, y la clasificación científica de éstos, así como la aplicación de las mismas en tareas más o menos «intelectuales». A todo ello le quería dar la índole de estudio teórico, abriendo paso a una disciplina científica nueva, que él denominaba «automática».

El vínculo principal con Babbage lo encontramos en «Ensayos sobre automática»⁴⁴, donde da una escueta biografía de Babbage que in-

⁴² «de las numerosas secciones de las ciencias puras y aplicadas que dependen para su desarrollo, registro o aplicación, de la ciencia dominante de las matemáticas, ninguna de ellas dejaría de ser acelerada en su progreso, y facilitada en sus investigaciones, gracias al control completo sobre la interpretación numérica de las expresiones matemáticas abstractas, y con la exención de la larga tarea de cálculo, lo cual podría asegurar el científico mediante la existencia de maquinaria capaz de realizar los cálculos más complicados y tediosos con rapidez, automatismo y precisión», LUDGATE (1909)

⁴³ Torres Quevedo, ingeniero santanderino nacido en 1852, al contrario que Ludgate, logró gran reconocimiento, fue presidente de la academia de ciencias de Madrid, miembro de la Académie des Sciences francesa, y un inventor conocido y prolífico, siendo sus primeros inventos calculadoras analógicas de gran ingenio y originalidad. Pionero del radio control, en 1906 exhibió un bote radiocontrolado en el Abra bilbaíno, ante el Rey. Además, inventó una nave aérea semi-rígida (un dirigible que mejora el diseño de Zeppelin), usada por ambos bandos de la 1ª guerra mundial. Una de sus invenciones aún admira a los turistas en las cataratas del Niágara: el aero-carro español, montado en 1916. En 1911 desarrolló el primer autómata jugador de ajedrez, que resolvía el final del juego de torre y rey contra rey, percibía la situación de las piezas mediante un sistema electromagnético, y las movía con un brazo mecánico (poco después desarrolló un sistema de magnetos bajo el tablero para moverlas suavemente) su funcionamiento era completamente automático, el ejemplar aún existe y sigue operativo.

⁴⁴ TORRES QUEVEDO (1915).

cluye sus intentos con la Máquina de las Diferencias y la Máquina Analítica, describiendo esta última como un ejemplo de sus propias teorías y de las posibilidades de las máquinas. El nivel de conocimiento de Torres Quevedo acerca de las máquinas de Babbage parece bastante preciso, aunque no se detiene demasiado en la descripción de las mismas, y parece asumir que el público interesado las conoce de sobra. En esta obra incluye el diseño de una máquina analítica particular para desarrollar de manera limitada a unos pocos dígitos la fórmula, se compone de aparatos electromecánicos y electromagnéticos para almacenar dígitos decimales, para realizar operaciones usando tablas internas y sistemas de comparación entre dos cantidades. El control de la máquina era un programa de sólo lectura, que incluía el uso de los condicionales, implementado en una trama de superficies conductoras montada sobre un cilindro rotativo. El artículo incluye, incidentalmente, una descripción del primer sistema conocido de coma flotante.

Según Randell (1982), Torres Quevedo habría sido capaz de montar un ordenador de propósito general más de 20 años avanzado a su tiempo, en el caso de haber tenido la motivación y la financiación. Esto es así porque, además de proponer diseños teóricos desarrolló varios prototipos:

Tras escribir el ensayo sobre automática construyó un pequeño prototipo de máquina analítica electromecánica limitada, que calculaba automáticamente la función para unos pocos dígitos.

El primer prototipo importante es el Aritmómetro Electromecánico, presentado en París durante los actos conmemorativos del centenario del aritmómetro de Thomas de Colmar. La máquina desarrollaba todas las operaciones aritméticas de manera absolutamente automática: recibe como entrada de comando los impulsos eléctricos producidos por una máquina de escribir con unos sensores y revierte el resultado de nuevo a la máquina de escribir mediante un mecanismo eléctrico que mueve los tipos.

Estos prototipos no eran para Torres Quevedo más que una demostración de sus teorías automáticas electromecánicas, y no se puede más que especular sobre las repercusiones que hubiera tenido su aplicación a la construcción de un ordenador completo o el conocimiento de su obra en el mundo angloparlante; no parece que su obra tuviese ninguna influencia sobre la definitiva invención de los ordenadores durante la segunda guerra mundial. Pese a ello, la carrera de Torres

Quevedo se puede calificar de exitosa, siendo su figura reconocida ampliamente dentro y fuera de España⁴⁵, Gran parte de sus máquinas están expuestas en el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.

Moraleja

Como hemos visto en estos últimos dos ejemplos, durante las primeras décadas del siglo XX, tanto Ludgate como Torres Quevedo dispusieron de diseños perfeccionados de máquinas analíticas equivalentes a las de Babbage, ambos intentaron dar repercusión a los objetivos y logros del propio Babbage, e incluso Torres Quevedo desarrolló algunos prototipos famosos con tecnologías muy innovadoras. A pesar de todo ello, nadie intentó la construcción real de este tipo de máquinas hasta unos 20 años después.

Es sencillo atribuir al amateurismo de Ludgate la tibieza con que afrontó el asunto de la máquina analítica, quedando su aportación como una mera muestra de la continuidad de la tradición de calculadoras automáticas que parte de la máquina analítica de Babbage y termina en el Mark I. Por el contrario, no es fácil desentrañar las causas que llevaron a Torres Quevedo, ejecutor experimentado de proyectos tecnológicos de gran escala, a contentarse con un pequeño prototipo parcial de la máquina analítica.

Torres Quevedo expresa abiertamente sus opiniones sobre la posibilidad de la construcción de una máquina analítica como la de Babbage en la conclusión de su obra teórica principal⁴⁶, según él, el problema era demasiado complejo como para darle una solución mecánica, ya que ni siquiera el titánico esfuerzo del genio insuperable de Babbage pudo con el problema. Su opción es el uso de tecnología electromecánica, el problema es que en un circuito, un contacto tiene una probabilidad más o menos alta de no realizarse, con lo que sería necesario tomar todo tipo de precauciones electrotécnicas en aras de la precisión del cálculo. De todos modos, afirma que las calculadoras electromecánicas nunca alcanzarán la precisión de las mecánicas. El ensayo finaliza con disculpas por no tener que ocuparse, de momento, por ese tipo de cosas.

⁴⁵ RODRÍGUEZ ALCALDE (1966); RODRÍGUEZ ALCALDE (1974); SANTESMASES (1980).

⁴⁶ TORRES QUEVEDO (1915), VI.

Por tanto, parece claro que Torres Quevedo consideraba la máquina analítica a modo de una mera posibilidad demasiado compleja como para ser ejecutada, incluso con las simplificaciones electromecánicas, dentro de los límites razonables de tiempo, esfuerzo y gasto.

CONCLUSIÓN

Hasta aquí hemos descrito, desde un punto de vista fundamentalmente histórico, una serie de casos de emergencia fallida (o retardo) de una innovación tecnocientífica que parece de capital importancia para la vida y la ciencia: el cálculo automático.

Ahora intentaremos, en un talante algo más filosófico, resumir lo que estas historias de innovaciones desaprovechadas pueden enseñarnos acerca de las condiciones de evolución y desarrollo de las innovaciones tecnológicas de alta complejidad.

La estrategia para explicar el fracaso de Babbage (quien, además de ser el primero, fue quien más cerca estuvo de conseguir el éxito) pasaba por postular la existencia de ciertas componentes desconocidas en el planteamiento del problema:

Hemos señalado una inconmensurabilidad entre las perspectivas *metateóricas* (Grattan-Guinness) y *sociohistóricas* (Hyman) respecto del fracaso de la máquina analítica, esto es así porque la primera de ellas se centra en el estudio de los *valores nucleares* del fenómeno histórico de Babbage, y la segunda se apoya en el estudio de los *valores contextuales* implicados en el fracaso. Así, según la visión metateórica, los problemas que impidieron la implantación de la máquina analítica se relacionan con deficiencias o conflictos con al menos uno de estos aspectos de la invención: *eficacia, utilidad y facilidad de uso, precisión y potencia*⁴⁷. Por el contrario, la visión sociohistórica aduce causas psicológicas, políticas y culturales, conflictos con valores éticos (honestidad), intereses corporativos respecto de la emergencia de una nueva clase de burguesía técnica industrial independiente de las costumbres e instituciones científicas, la equivalente separación victoriana entre la ciencia natural y la tecnología, la decadencia de las instituciones científicas inglesas, y una larga lista de enmarañados agentes de resistencia a la implantación del cálculo automático.

⁴⁷ Estos son los valores nucleares típicos a satisfacer por las innovaciones tecnocientíficas. J. ECHEVERRÍA (1995), p. 62.

Se hace necesario un tercer punto de vista que relacione las componentes internas o nucleares (científico-técnicas) y las contextuales (sociales) para obtener una descripción coherente del retraso de la revolución del cálculo automático. Esta componente explicativa, que hasta ahora ha estado ausente en los análisis del fracaso de la máquina analítica, ha de tratar acerca de la dinámica de relaciones entre la ciencia, la tecnología y la sociedad: En particular, es aquella que analiza *las condiciones generales de las revoluciones tecnológicas*, se nutre en la economía y la filosofía de la tecnología, y aunque aún no está ni mucho menos atrincherada como posición filosófica, proporciona el único asidero conceptual restante en el enigma de la máquina analítica.

En este marco, hemos encontrado dos condiciones necesarias para la implantación cultural del cálculo automático que no fueron satisfechas hasta mediados del siglo XX:

- a) Un cierto ajuste o adaptación entre la innovación técnica y el «medio ambiente» tecnológico, científico, social y político donde surge.
- b) Un cierto ajuste o adaptación entre la complejidad de las estructuras y funciones de los mecanismos proyectados y la complejidad de la estructura social y de gerencia de la(s) institución(es) y/o empresa(s) encomendada(s) a su construcción.

Desde el trabajo de Joseph Schumpeter, la economía de la tecnología ha estudiado el cambio tecnológico como un proceso evolutivo cuyas fuerzas son la diversidad técnica y la selección ambiental por la competencia. Las teorías económicas evolucionistas neo-schumpeterianas suelen enfatizar la no-linealidad y la realimentación positiva de la dinámica evolutiva tecnoeconómica, en otras palabras, el modelo evolutivo que usan esta más cercano al «equilibrio punteado» de Gould y Eldredge⁴⁸ que al gradualismo neo-darwinista tradicional: Intentan explicar los cambios tecnológicos pequeños por fenómenos de difusión, y los grandes por la generación de nuevas variaciones. La noción económica paralela al fitness biológico sería la competitividad en el mercado del nuevo método o producto. El problema de este enfoque aplicado a la tecnología es el mismo que en biología: aunque proporciona

⁴⁸ ELDRIDGE & GOULD (1972).

una explicación de la necesidad de la dinámica saltacional de la evolución, no ofrece argumentos racionales para comprender las condiciones que permiten a una variación dar lugar a un gran salto evolutivo⁴⁹ en lugar de extinguirse.

Según Piore & Sabel (1984), este tipo de grandes revoluciones tecnológicas, además de marcar una nueva senda de desarrollo industrial, organizan una nueva ortodoxia, generalizando patrones de producción e investigación antes dispersos y emergentes. Esta nueva ortodoxia, o «paradigma tecnológico», en palabras de Dosi (1991), puede caracterizarse mediante un conjunto de ejemplares representativos (máquina de vapor, imprenta) y unas reglas heurísticas que canalizan la invención (las mutaciones no son al azar, como en biología).

Por otro lado, desde la sociología del conocimiento científico se han utilizado las ideas de Kuhn sobre el cambio científico revolucionario para defender el valor causal de factores no-epistémicos en los grandes cambios tecnológicos. Si bien este tipo de factores no han quedado precisados con suficiente claridad, lo que parece claro es el paralelismo entre las distinciones kuhnianas de ciencia normal y ciencia revolucionaria con los periodos en que el cambio tecnológico es gradual (dentro de un paradigma) y abrupto (cambio de paradigma).

Este tipo de enfoques tienen un problema explicativo profundo, y es la gran dificultad de precisar la naturaleza del ambiente donde se da la selección de tecnología, ya que este incluye probablemente una amalgama de factores técnicos, epistémicos, sociológicos, políticos e institucionales.

En este sentido, Marta González García, José A. López Cerezo y José A. Luján López (1996) han proporcionado otra posible relación entre las explicaciones económicas y las sociológicas de las revoluciones tecnológicas mediante una nueva analogía biológica:

Basándose en el postulado de Freeman y Pérez (1988), sobre la existencia de paradigmas tecnoeconómicos que incluyen las relaciones y propiedades de los diferentes paradigmas tecnológicos, estos autores proponen una *analogía funcional* entre la noción de paradigma tecno-

⁴⁹ Dicho de otro modo, con una metáfora frecuentemente usada por Gould, si rebobinamos la cinta de la historia de la tecnología (o de la historia de la vida) y la volvemos a reproducir, probablemente nos encontraremos con que no reconocemos ninguna canción.

lógico y la de ecosistema en lugar de analizar la dinámica darwinista de variación-selección de productos o métodos de producción:

«Los cambios de 'ecosistemas tecnológicos' (sociosistemas o sistemas sociotécnicos) son producto de distintos factores como la ciencia y la tecnología, pero también de otros como cambios institucionales, políticos, económicos, regulativos, etc». Marta González García, José A. López Cerezo y José A. Luján López (1996) (p. 121).

Desde este punto de vista, las tecnologías se ven como formas de organización social que involucran, además del uso o producción de artefactos y procesos de gestión de los recursos, vínculos funcionales con otras tecnologías y diversos parámetros socioculturales. Al igual que el ecosistema, el sociosistema es un complejo en inestable equilibrio con enmarañados procesos de regulación: cuando se produce un cambio en su estructura, o bien cambia en su totalidad hasta un nuevo estado de equilibrio o la variación desaparece y es absorbida dentro del atractor dominante:

«La innovación tecnológica y la intervención ambiental ignoran a menudo las características del sociosistema donde van a integrarse». Marta González García, José A. López Cerezo y José A. Luján López (1996) (p. 141).

Aunque esta visión es muy sugerente, ya que permite definir las presiones selectivas sufridas por las tecnologías emergentes, la noción de sociosistema adolece de las mismas dificultades teóricas que la de ecosistema, ya que tanto su «frontera» como sus estados de «equilibrio» son sumamente difusos. La principal aportación es la explicación de las diferentes tecnologías como los elementos estructurales de un sociosistema, permitiendo el análisis de los procesos de organización tecnológica.

Mediante este análisis, el retardo del cálculo automático puede ser visto como causado por la carencia de un sociosistema propicio, ahora bien, esto no explica qué entendemos por sociosistema propicio para el cálculo automático, ni qué factores son los necesarios para su implantación y florecimiento. Lo único que podemos afirmar es que como Babbage no consiguió llevar al sociosistema a otro estado de equilibrio, la variación introducida por sus máquinas calculadoras desapareció antes de nacer. De esta interpretación podemos extraer algunas consecuencias:

Dado que la máquina analítica era teóricamente correcta y técnicamente viable, las constricciones que resultaron letales en su desarrollo tienen que provenir del ámbito político, social o institucional. Como hemos visto, Babbage sufrió problemas de tipo político e institucional durante el proyecto de la máquina de diferencias, pero, unos años más tarde, el gobierno británico financiaba a instancias de Babbage una de las máquinas de diferencias suecas, por lo tanto, los problemas políticos e institucionales eran, después de todo, salvables gracias a las buenas influencias y el carisma del genial matemático. Solo queda una cuestión:

¿Cuál es la restricción social que dio al traste con la primera emergencia del cálculo automático?

La hipótesis que hemos escogido para explicar este punto crucial tiene que ver con nuevos mecanismos de ajuste (o estrategias de búsqueda del equilibrio) propios de los sociosistemas industrializados contemporáneos ante las nuevas tecnologías emergentes que plantean retos como tales como la complejidad extrema de los procesos de producción o de los productos mismos.

Desde la segunda revolución industrial la evolución de las manufacturas se apoya tanto en la innovación tecnológica como en la innovación en las técnicas de gerencia y dirección⁵⁰.

Especialmente desde la segunda guerra mundial, los ingenieros, científicos, y directivos se han visto inmersos en los problemas ocasionados por la complejidad tecnológica, y como resultado, han tenido que desarrollar soluciones muy elaboradas a la denominada «crisis de control»⁵¹.

El caso paradigmático es el de la transformación de la organización de la actividad científica, tecnológica y empresarial durante el desarrollo de las grandes industrias científicas financiadas por el ejército americano tras la segunda guerra mundial⁵².

⁵⁰ A. CHANDLER (1991) defiende, basándose en un exhaustivo estudio de las técnicas de dirección de las grandes firmas de manufacturas entre 1870 y 1950, que la segunda revolución industrial era debida a las revoluciones de las técnicas de dirección antes que a las revoluciones tecnológicas.

⁵¹ J. R. BENIGER (1986) argumenta que la sociedad de la información tiene su origen tecnológico y social en la llamada «revolución del control».

⁵² S. P. WARING (1991) muestra cómo las innovaciones durante esa época en las técnicas de dirección han permitido los avances tecnológicos de las décadas más recientes.

Las principales innovaciones en las técnicas de dirección y gerencia de las empresas científicas durante los años '40 son la aplicación del análisis y la ingeniería de sistemas, el control telemático, las redes de dirección, y especialmente el uso de comités asesores interdisciplinarios, que ayudaron a estructurar los diferentes proyectos de investigación y desarrollo así como la estructura de las organizaciones que debían presidirlos⁵³.

Con este tipo de proyectos, el gobierno norteamericano invertía no sólo en armamento y ciencia básica, sino que obligaba a crear una dinámica de cooperación entre la industria y los laboratorios universitarios que hasta entonces era desconocida.

No es casual que la revolución de los ordenadores haya surgido en este contexto de fuerte colaboración entre las grandes empresas de manufacturas y la universidad bajo la dirección de grupos de expertos de diversa formación.

La actividad desarrollada en este ámbito cambió definitivamente el tecnosistema, abriendo nuevas pautas de producción e investigación adaptadas a la construcción, desarrollo y uso, de artefactos de alta complejidad. La actividad durante esta época de *Big Science*, alteró definitivamente la estructura social del tecnosistema mediante valores y teorías de dirección dirigidas al control de los proyectos científicos y técnicos, con ello se generaron nuevos puntos de equilibrio tecnológico, permitiendo nuevas oportunidades o direcciones de evolución económica. Generó, en suma, el nuevo *ethos* científico, técnico y empresarial de los «proyectos de investigación», y con ello las figuras o *roles* del «director de proyecto», del moderno científico investigador, del ingeniero innovador y del empresario de investigación y desarrollo, todos ellos sumamente dispuestos y capacitados para consumir y producir equipos automáticos para el procesamiento de datos.

La condición de tipo social que no podía satisfacerse en la época de Babbage tiene que ver con la estructura de la sociedad científica: a lo largo del siglo XIX, las figuras del científico y del ingeniero fueron distanciándose cada vez más, por otro lado, eran muy pocos los científicos cuya labor era la mera investigación, desarrollando, la mayor parte

⁵³ T. P. HUGHES (1995) enfatiza la importancia de los comités interdisciplinarios y la estructura jerarquizada y modular de los organismos creados para los diferentes programas de investigación durante el proyecto Manhattan en la resolución de los problemas de organización planteados por la complejidad de los artefactos a construir.

de ellos, labores docentes o de otro tipo (no había «proyectos de investigación» con financiación del gobierno, como hemos visto, estos son un fenómeno reciente). Esto explica el hecho de que las máquinas de diferencias suecas se dedicasen a criar polvo durante toda su existencia. El tecnosistema decimonónico carecía de los medios o los motivos⁵⁴ para generar la flexibilidad suficiente para asimilar las innovaciones en prácticas y métodos que podrían surgir de la aplicación de las máquinas de diferencias, *ergo* no obstante haberlas construido, las mantuvo inactivas, nadie sintió la necesidad de su uso.

Ahora bien, en el caso de la máquina analítica, que nunca llegó a construirse seriamente y permaneció como una especie de estudio previo o desarrollo experimental, se puede llegar a pensar que Babbage intuía, a su manera, la posibilidad de que, aunque pudiese completar una máquina analítica funcional, no por ello sería usada propiamente hasta más de cien años después.

La prueba de esto la tenemos en su estudio sobre la economía de la manufactura⁵⁵, escrito el año anterior al inicio de la máquina analítica, donde trata fundamentalmente de un fenómeno central en la organización de los modernos «programas de investigación científica», la división del trabajo, especialmente en el último capítulo de dicha obra, que versa de las «futuras perspectivas de las manufacturas, relacionadas con la ciencia» y la división del trabajo intelectual.

En este sentido, Babbage defendía la financiación pública de la ciencia⁵⁶, del mismo modo, era sensible a la extrema importancia social de la relación fluida entre empresarios industriales y científicos teó-

⁵⁴ Hemos de recordar que *el motivo de estado* para la financiación pública de la investigación durante la guerra y la postguerra era, desgraciadamente, uno de los que impulsan con mayor fuerza a los gobiernos de todo el mundo y todas las épocas: aniquilar al enemigo.

⁵⁵ BABBAGE (1833). Este estudio, como señala el prominente politólogo de la economía NATHAN ROSEMBERG (1997), inaugura la economía de la tecnología y las teorías sobre el progreso tecnológico.

⁵⁶ «(...) el descubrimiento de los grandes principios de la naturaleza exige una mente casi exclusivamente consagrada a tales investigaciones; y estas, en el estado presente de la ciencia, precisan frecuentemente aparatos costosos, imponiendo una pérdida de tiempo incompatible con vocaciones profesionales. Por lo tanto, se hace necesario considerar si sería una buena política el compensar por esas privaciones, a las que están expuestos quienes cultivan las más altas parcelas de la ciencia; y cuál sea el mejor modo de efectuar esta compensación es un asunto que interesa tanto al filósofo como al hombre de estado». BABBAGE (1833), Cap. XXXV, § 454. Traducción propia.

ricos⁵⁷; también había previsto la posibilidad general de que un artefacto innovador bien ejecutado fracasase⁵⁸, e incluso era consciente de las dificultades que impone esta última circunstancia al cambio tecnológico, ya que los nuevos avances siempre resultan más caros⁵⁹ al principio.

Así, la actitud de Babbage hacia la máquina analítica quedaría explicada por su intuición de los límites sociales en el desarrollo del cálculo automático, circunscribiéndose a las primeras etapas de evolución práctica, en ausencia de una estructura social propicia para el cálculo automático.

Con ese mismo argumento hemos explicado el retardo del surgimiento de los ordenadores y el fracaso de todos los demás intentos hasta que la estructura y estabilidad de las instituciones de investigación científico-técnica fuese la apropiada.

Para finalizar, podemos extrapolar estas conclusiones así:

En el desarrollo histórico de proyectos tecnocientíficos complejos e innovadores se puede constatar que su inclusión en la cultura está determinada por la estructura social del momento y del lugar donde se dan (sociosistema y tecnosistema): Las innovaciones de alta complejidad no aumentan necesariamente la complejidad de las instituciones de investigación y desarrollo donde emergen, al contrario, la posibilidad de llevar a la práctica una innovación tecnocientífica de alta complejidad

⁵⁷ «(...) Los hombres de ciencia obtendrán información práctica de los grandes manufactureros —el químico estará en deuda con la misma fuente por sustancias que existen en una cantidad tan pequeña que sólo se hacen visibles en las operaciones de mayor extensión—. BABBAGE (1833), Cap. XXXV, § 457. Traducción propia.

⁵⁸ «Cuando los dibujos de una máquina se han realizado correctamente, y las partes se han ejecutado bien, e incluso cuando el trabajo que produce posee todas las cualidades que se habían anticipado, aún puede fallar el invento; esto es: *podría fallar al no ser convertido en una práctica general*. Esto surge con frecuencia por la circunstancia de producir su trabajo a un coste mayor del de otros métodos». BABBAGE (1833), Cap. XXVII, § 325. Traducción propia

⁵⁹ «Casi siempre es muy difícil hacer una esta estimación de gasto: cuanto más complicado el mecanismo, más complicada es la tarea; y en caso de gran complejidad y extensión de la maquinaria es casi imposible. Se ha estimado groseramente, que el primer ejemplar de cualquier nueva máquina inventada, cuesta unas cinco veces más que la construcción de la segunda, una estimación que es, quizás, lo suficientemente cercana a la realidad. (...) Cuando, de todas maneras, se han completado dos o tres máquinas, y se necesitan muchas más, se pueden producir, usualmente, a mucho menos de un quinto del coste del invento original». BABBAGE (1833), Cap. XXVII, § 326. Traducción propia

dad depende directamente de la complejidad social de la estructura de las instituciones que la van a realizar. El cambio en la estructura social está impulsado por fuerzas mayoritariamente extra-científicas, o al menos no principalmente técnicas ni epistémicas⁶⁰ (cataclismos socioeconómicos como la revolución y la guerra, o bien ajustes bruscos en la estructura económica impuestos por la dinámica económica o ecológica), mientras que la fuerza creativa de la innovación tecnológica es de carácter eminentemente conceptual y cultural, por ello, a menudo la emergencia de grandes avances técnicos es socialmente inoportuna, y pasan, sin pena ni gloria, al panteón de la historia.

Este trabajo es fruto de una beca predoctoral del Gobierno Vasco.

REFERENCIAS

- Aspray, W.; Bromley, A. G.; Campbell-Kelly, M.; Ceruzzi, P. E.; Williams, M. R. (1990) *Computing before computers*, Ames IA, Iowa State University Press.
- Babbage, C. (1813) «On continued products». *Memoirs of the Analytical Society*, 1-31. En: Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) Vol. 1, cap. II
- Babbage, C. (1815) «An essay towards the calculus of functions». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 105, 389-423. En: Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) Vol. 1, cap. III.
- Babbage, C. (1816) «An essay towards the calculus of functions, part II». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 106, 179-256. En: Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) Vol. 1, cap. IV.
- Babbage, C. (1816a) «Demonstrations of some Dr Matthew Stewart's general theorems; to which is added, an account of some new properties of the circle». *Journal of Science*, 1, 6-24. En Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) Vol. 1, cap. V.
- Babbage, C. (1817) «Solutions of some problems by means of the calculus of functions». *Journal of Science*, 2, 371-379. En: Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) Vol. 1, cap. VIII.
- Babbage, C. (1817b) «Observations on the analogy which subsists between the calculus of functions and the other branches of analysis», *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 107, 197-216. En: Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) Vol. 1, cap. VII.

⁶⁰ A no ser que consideremos como tecnología de alta complejidad a las técnicas de dirección dirigidas a optimizar el desarrollo y la construcción de esas mismas tecnologías, lo que parece poco probable. Desde mi punto de vista no son tecnologías sociales, sino formas de organización social.

- Babbage, C. (1826a) «On a method of expressing by signs the action of machinery», *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 116(3), 250-256. En: Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) Vol. 3, Sec. C, cap. I.
- Babbage, C. (1827) «On the influence of signs in mathematical reasoning». *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 2(2), 325-377. En Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) Vol. 1, cap. XVII
- Babbage, C. (1827) «On the influence of signs in mathematical reasoning». *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 2(2), 325-377. En Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) Vol. 1, cap. XVII.
- Babbage, C. (1830) «Notation». *The Edinburgh Encyclopedia*, 15, 394-399. En: Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) Vol. 1, cap. XVIII.
- Babbage, C. (1830a) «Reflections on the decline of Science in England and of some of its causes», B. Fellowes, London. En Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) Vol. 7
- Babbage, C. (1833) *The economy of machinery and manufacture*. Londres, C. Knight. En: M. Campbell-Kelly (1989) Vol. 8.
- Babbage, C. (1834) «Statement adressed to the Duke of Wellington respecting the calculating engine». Se trata de una carta de la que Babbage conservó una copia, que se conserva en el compendio de correspondencia de Babbage de los fondos manuscritos del British Museum. En: Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) Vol. 3, cap. I.
- Babbage, C. (1837), *The ninth Bridgewater treatise*. Londres, J. Murray. En: CCampbell-Kelly, M. (ed.) (1989) Vol. 9
- Babbage, C. (1837a), «On the mathematical powers of the calculating engine». Manuscrito de la colección Buxton MMS del museo de historia de la ciencia de Oxford. En: Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) Vol. 3, cap. IV.
- Babbage, C. (1843), «Addition to the Memoir of M. Menabrea on the Analytical Engine». En: Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) Vol. 3, cap. VI.
- Babbage, C. (1847), «Observations on the Temple of Serapis at Pouzzoli near Naples». Londres, R. & J. E. Taylor. En: Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) Vol. 4, cap. XX.
- Babbage, C. (1851), «Laws of mechanical notation», Panfleto impreso por el propio Babbage y repartido en la Gran Exposición de Londres (1851) para llamar la atención sobre su trabajo. En: Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) Vol. 3, Sec C, cap. II.
- Babbage, C. (1864), «Passages from the life of a philosopher». Londres, Longman, Green, Roberts & Green. En: Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) Vol 11.
- Beniger, J. R. (1986) *The control revolution. Technological and Economic Origins of the Information Society*. Harvard University Press, Cambridge MA.
- Bromley, A. G. (1982) «Charles Babbage's Analytical engine 1838». *Annals of the History of Computing*, 4(3), 196-217.

- Bromley, A. G. (1987) «The evolution of Babbage's calculating engines», *Annals of the History of Computing*, 9(2), 113-136.
- Buxton, H. W. (1988) «Memoir of the life and labour of the late Charles Babbage» ESQ F. S. R. Serie «Charles Babbage Institute reprint series for the history of computing», 13, Cambridge, MA, MIT Press.
- Campbell-Kelly, M. (1994) «Charles Babbage and the assurance of lives». *Annals of the History of Computing*, 16(3), 5-14.
- Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) *The Works of Charles Babbage*. Nueva York, New York University Press, 11 volúmenes.
- Chandler, A. (1991) *Scale and Scope. The dynamics of Industrial Capitalism*. Belknap, Harvard Univ. Press. Cambridge MA.
- Collier, B. (1990) *The little Engines that Could've. The calculating machines of Charles Babbage*. Nueva York, Garland Pub. Única edición reprográfica de la tesis doctoral del autor, leída en Harvard en 1970.
- Dosi, G. (1991) Perspectives on Evolutionary Theory, *Science and Public policy*, 18-6, pp. 353-361.
- Dubbey, J. M. (1978) *The mathematical work of Charles Babbage*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Dubbey, J. M. (1979) «British Mathematics (1800-1830) II, the Analytical Society». *Bulletin of the Institute of Mathematics and its Applications*, 15(4), 82-88.
- Eldredge, N. & Gould, S. J., 1972, Punctuated Equilibria: An alternative to Phyletic Gradualism. Reimpreso en N. Eldredge (1985) Time Frames, *The Evolution of Punctuated Equilibria*, Princeton, NJ, Princeton University Press, pp. 193-229.
- Franksen, O. I. (1981) «Mr. Babbage, the difference engine, and the problem of notation. An account of the origin of recursiveness and conditionals in computer programming». *International Journal of Engineering Science*, 19(12), 1657-1694.
- Franksen, O. I. (1991) «Babbage and cryptography. Or, the mystery of Admiral Beaufort's cypher», *Mathematics and Computers in Simulations*, 35(4), 327-36.
- Freeman, C. & Perez, C. (1988) Structural Crises of Adjustment: Business Cycles and Investment Behaviour. En DOSI et al. (1988) *Technical change and economic theory*. Frances Pinter, Londres.
- González García, M., López Cerezo, J. A. y Luján López, J. A. (1996) *Ciencia, tecnología y sociedad*. Tecnos, Madrid.
- Grattan-Guinness, I. (1989) «Babbage's Mathematics in it's time». *British Journal for the History of Science*, 12(40), 82-88.
- Grattan-Guinness, I. (1992) «Charles Babbage as an algorithmic thinker». *Annals of the History of Computing*, 14(3), 34-48.
- Hilts, V. L. (1978) «Aliis extendum, or the origins of the Statistical Society of London». *Isis*, 69(246), 21-23.

- Hughes, T. P. (1995) Managing complexity: interdisciplinary advisory committees. En R. Fox (ed.) (1995) *Technological Change*. Harwood. Amsterdam pp. 229-245.
- Hyman, A. (1982) *Charles Babbage Pioneer of the Computer*. Princeton NJ, Princeton Univ. Press.
- Hyman, A. (1996) «Whiggism in the History of Science and the Study of the Life and Work of Charles Babbage». Disponible en Internet en el URL: <http://www.ex.ac.uk/BABBAGE/whiggism.html>.
- Katz, K. (1982) *The impact of the Analytical Society on Mathematics in England in the first half of the nineteenth century*. Nueva York, New York University (tesis doctoral).
- Lindgren, M. (1990) *The difference engines of Johan Muller, Charles Babbage and Georg and Edvard Scheutz*. Cambridge MA, MIT Press.
- Lovelace, A. A., Menabrea, L. (1843), *Sketch of the Analytical Engine invented by Charles Babbage Esq.* By L.F. Menabrea, of Turin, officer of the Military Engineers, with notes upon the memoir by the translator. Usamos la versión editada en: Campbell-Kelly, M. (ed.) (1989) *The Works of Charles Babbage*. Vol. 3, cap. VII. Nueva York, New York University Press.
- Ludgate, P (1909) «On a proposed analytical machine». *Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society*, 12(9), 77-91.
- Ludgate, P (1914) «Automatic calculating machines». En Napier Tercentenary Celebration: Handbook of the Exhibition. E. M. Horsburg (ed.), Edimburgo, Royal Society of Edinburgh, 124-127.
- Piore, M. J., Sabel, C. F. (1984) *La segunda ruptura industrial*, Alianza, Madrid 1990.
- Randell, B. (1982) «From Analytical engine to electric digital computing: the contributions of Ludgate, Torres and Bush». *Annals of the History of Computing*, 4(4), 327-341.
- Rodríguez Alcalde (1966) *Torres Quevedo y la cibernética*. Madrid, Ediciones Cid.
- Rodríguez Alcalde (1974) *Biografía de Don Leonardo Torres Quevedo*. Madrid. Institución Cultural de Cantabria, CSIC, Diputación Provincial de Santander.
- Rosemberg, N. (1997) «Babbage: Pioneer Economist». Disponible en el URL: <http://www.ex.ac.uk/BABBAGE/rosenb.html>.
- Santesmases, J. G. (1980) *Obra e inventos de Torres Quevedo*. Madrid, Instituto de España.
- Staff of the Harvard Computation Laboratory (1946) *A manual of operation for the automatic sequence controlled calculator*. Serie «The Charles Babbage Series for the History of Computing», 8, Londres, MIT & Tomash Publishers, 1985.
- Torres Quevedo, L. (1913) «Ensayos sobre automática - su definición. Extensión teórica de sus aplicaciones». *Revista de la Real Academia de las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 12, 391-314.

- Waring, S. P. (1991) *Taylorism Transformed Scientific Management Theory Since 1945*. Univ of North Carolina Press. Chapel Hill, NC.
- Wilkes, M. V. (1981) «The design of a control unit, reflections on Babbage's notebooks». *Annals of the History of Computing*, 3(2),116-120.
- Wilkes, M. V. (1991) «Babbage's expectations for his engines». *Annals of the History of Computing*, 13(2), 141-145.