

Ordenador Analógico

Florencio Jesús Cembranos Nistal



Revista Digital de ACTA

2015

Publicación patrocinada por



Ordenador Analógico

© 2015, **Florencio Jesús Cembranos Nistal**

© 2015,  **ACTA**

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley.

Se autorizan los enlaces a este artículo.

ACTA no se hace responsable de las opiniones personales reflejadas en este artículo.

INTRODUCCIÓN

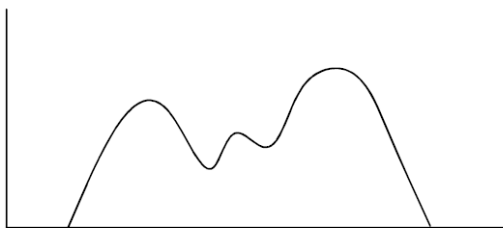
Para la transmisión y codificación de información la electrónica ha utilizado tanto la transmisión analógica como la codificación digital.

La señal de salida en la electrónica analógica es, en todo momento, proporcional a la señal de entrada o, dicho en términos más precisos, el valor instantáneo de la salida corresponde con el valor instantáneo de la entrada en ese preciso instante.

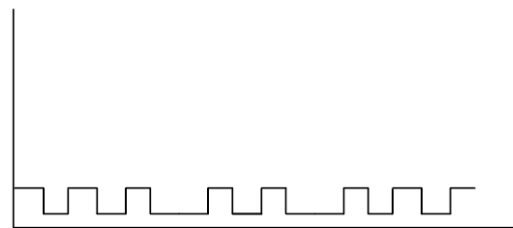
En electrónica digital la señal de salida es una codificación de la respuesta proporcional a la señal de entrada.

La señal analógica sigue, en todo momento, a la señal de entrada. En cada etapa del circuito electrónico esta señal es amplificada, modificada, realimentada, etc. Tal como se han diseñado los circuitos analógicos estas señales pueden amplificar, modificar y realimentar no sólo la señal de entrada sino los ruidos internos del circuito e interferencias electrónicas. La señal de salida no es exactamente fiel en todo momento a la señal de entrada.

La señal digital no tiene problemas de ruidos e interferencias, en principio, o, al menos, es más fácil detectarlas y eliminarlas. Además, la electrónica digital ha probado ser más sencilla de implementar que la analógica, y ha demostrado en los últimos años que cualquier circuito digital es capaz de realizar la misma función que hacía el analógico con más sencillez y exactitud.



Señal analógica: Son aquellas que pueden tomar un número infinito de valores comprendidos entre dos límites.



Señal digital: También llamadas variables discretas, entendiéndose por éstas, las variables que pueden tomar un número finito de valores.

Figura 1. Comparación entre una señal analógica y otra digital

LÍMITES DE LA ELECTRÓNICA DIGITAL

El gran avance de la electrónica digital se debió, en los años ochenta, a la aparición del ordenador personal, su rápida expansión y la utilización de la misma tecnología en el desarrollo de todos los dispositivos electrónicos conocidos: desde la radio convencional, los equipos de sonido, TV; hasta los electrodomésticos.

Gracias a este sistema de codificar y transmitir la información hemos podido llegar al punto de avance tecnológico del que disfrutamos.

Sin embargo, la electrónica digital tiene límites y está llegando un punto en que es necesario mejorar la tecnología o cambiar el método de codificación y transmisión de la información.

LÍMITES DE TIEMPO Y DE EXACTITUD

En un proceso industrial los autómatas programables digitales controlan perfectamente toda la producción y gestionan, sin ningún tipo de fallo, desde la primera hasta la última operación de una fábrica moderna.



Figura 2. Proceso industrial controlado mediante autómatas programables digitales.

Los motores y todos los sistemas de accionamiento se ponen en marcha o se detienen con tan sólo un bit de información. La orden de marcha y paro llega, prácticamente de forma instantánea, a cualquier elemento de la producción.



Figura 3. Regulador y visualizador de procesos analógicos.

Las señales de realimentación de las máquinas: temperatura, velocidad, presión, etc., son de tipo analógico y deben ser convertidas a digital para poder ser procesadas y, nuevamente, la respuesta en forma digital será convertida en analógica, para reenviar la información a la máquina o a una pantalla *visualizadora*.

Esta operación no es instantánea, necesita un tiempo. Este tiempo lo hemos asumido como despreciable. Pero los procesos no se están controlando en tiempo real. Desde que el mundo es digital, el concepto de tiempo real ha sido relativizado.

Por otra parte, la señal analógica "leída" al ser convertida a digital debe ser "troceada", lo que implica que la señal digital es una aproximación a la señal leída. Después de ser tratada debe volver a ser analógica, con lo que la señal de respuesta será otra aproximación de la señal real. Estos errores se convierten en irrelevantes a base de aumentar la resolución en bits de las señales digitales. Es decir, utilizamos "fuerza bruta" para solucionar el problema.

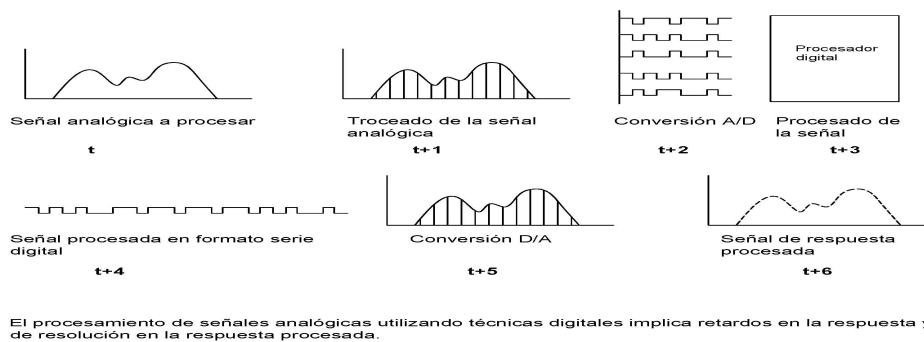


Figura 4. Procesamiento analógico-digital y digital-analógico.

La digitalización es una tecnología que se ha desarrollado con éxito para la transmisión de voz y video. En telefonía móvil, debido a la gran cantidad de información que se debe manejar, la calidad de audio todavía es inferior a la comunicación telefónica por cable (aunque ésta también se codifica en digital). La comunicación por tecnología móvil es buena pero, como todos hemos notado, nuestro cerebro necesita hacer un mayor esfuerzo para entender una conversación por un teléfono móvil. Esto es debido, también, a los retardos a la hora de convertir las señales analógicas en digitales y viceversa, y al necesario troceado o muestreo de la señal original para poder ser codificada.

VENTAJAS DE LA ELECTRÓNICA DIGITAL

Gracias a la codificación de las señales en digital se han obtenido una gran cantidad de avances electrónicos indudables.

Hoy en día consideramos como algo común hablar por teléfono móvil, buscar información en internet, seleccionar el tipo de programas que queremos ver en televisión, hacer transferencias bancarias en red o hacer un seguimiento desde un lugar remoto de la producción de nuestra empresa.

Todo esto es posible, no sólo por los avances tecnológicos, sino por la gran facilidad de proteger la información que enviamos y recibimos. Esto sólo ha sido posible utilizando la electrónica digital.

El reto está ahí: aumentar la velocidad y calidad de la transmisión. En realidad este ha sido siempre el reto que una y otra vez ha sido superado. Posiblemente estemos llegando a un punto en el que ya no es posible volver a rizar el rizo. ¿Cuál es el límite del ordenador digital? ¿Hasta dónde puede aumentar la velocidad de transmisión con los sistemas digitales actuales? ¿Podemos dar otra "vuelta de tuerca" a la tecnología digital sin que "rompa la rosca"?

Es el momento de plantearse un nuevo concepto de electrónica si queremos, no sólo mantener sino mejorar nuestra tecnología y, por supuesto, nuestra calidad de vida.

VUELTA A LA ELECTRÓNICA ANALÓGICA

Actualmente ya nadie se plantea que la electrónica analógica pueda tener un futuro en el mundo actual. Como muy poca gente se plantea que un vehículo eléctrico pueda superar en prestaciones al motor de combustión interna. Sin embargo, el motor eléctrico es superior en prestaciones al de combustión y la electrónica analógica es superior en prestaciones a la electrónica digital. El problema es dar con el "chip" adecuado.

EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL: CLAVE EN EL PROCESAMIENTO ANALÓGICO

No es nada nuevo. En los años previos a la aparición del ordenador digital como se conoce hoy, el Amplificador Operacional (AO) se utilizó para realizar cálculos con gran precisión y de forma instantánea. Se le denominó: ordenador analógico. Pero el tiempo le relegó a la estantería de los aparatos olvidados.

Si bien es cierto que utilizando AO las operaciones matemáticas se hacen de forma instantánea y con gran exactitud, sin embargo, la electrónica analógica implica, como ya se dijo, incremento de ruidos, interferencias y en consecuencia resultados que pueden ser erróneos. Además, la programación de los ordenadores analógicos era bastante compleja: en cada operación implicaba mover todos los po-

tenciómetros de entrada para ajustarlos a los valores de cálculo. La posición exacta dejaba mucho que desear.

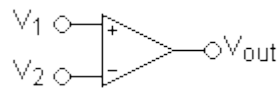
Actualmente, los problemas iniciales del ordenador analógico están superados y podemos rescatar su funcionamiento para obtener procesamientos matemáticos instantáneos y exactos.

Se va a tratar detenidamente la idea partiendo del funcionamiento básico de los AO hasta explicar cómo puede implementarse actualmente un procesador matemático basado en tecnología analógica e integrarlo dentro de nuestra tecnología digital.

Comenzaremos por repasar las características que debe tener el AO.

AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL

Se define un AO como aquel sistema electrónico que tiene dos entradas denominadas V1 y V2 y una salida que denominados Vout (ver figura).



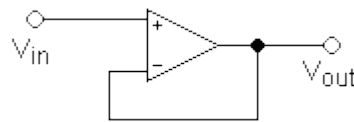
A la entrada V1 la denominaremos entrada no inversora y a la V2 entrada inversora. La ganancia de un AO ideal es infinita. En la práctica, la tensión máxima de salida será la de alimentación; ésta suele ser de +/- 15 V. De esta forma cuando la entrada no inversora (V1) sea superior a la inversora (V2), la salida (Vout) será la positiva de alimentación e inversamente:

$$V_{out} = \begin{cases} V_{S+} & V_1 > V_2 \\ V_{S-} & V_1 < V_2 \end{cases}$$

Trabajando con realimentación, la impedancia de entrada de un AO ideal es infinita, por lo que la corriente por las entradas es cero y la tensión en el punto V1 será igual a la tensión V2. Con estas premisas (muy resumidas) podemos analizar los principales circuitos realizados con AO.

SEGUIDOR DE TENSIÓN

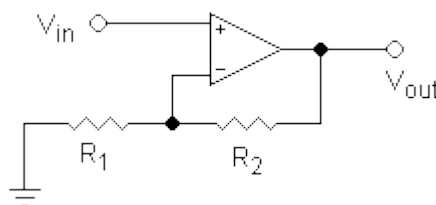
- Es aquel circuito que proporciona a la salida la misma tensión que a la entrada.



- Se usa como un buffer para eliminar efectos de carga o para adaptar impedancias (conectar un dispositivo con gran impedancia a otro con baja impedancia y viceversa).
- Como la tensión en las dos patillas de entradas es igual: $V_{out} = V_{in}$
- $Z_{in} = \infty$

Presenta la ventaja de que la impedancia de entrada es elevadísima, la de salida prácticamente nula, y puede ser útil, por ejemplo, para poder leer la tensión de un sensor con una intensidad muy pequeña que no afecte apenas a la medición. De hecho, es un circuito muy recomendado para realizar medidas de tensión lo más exactas posibles, pues al medir la tensión del sensor, la corriente pasa tanto por el sensor como por el voltímetro y la tensión a la entrada del voltímetro dependerá de la relación entre la resistencia del voltímetro y la resistencia del resto del conjunto formado por sensor, cableado y conexiones.

SUMADOR NO INVERSOR

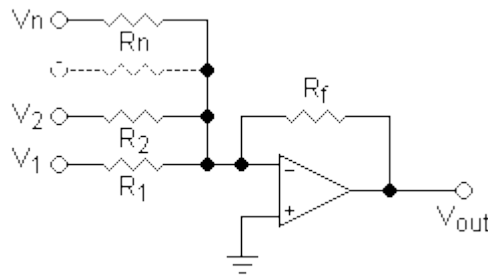


En este circuito la tensión de entrada se aplica al terminal positivo, pero como conocemos que la ganancia del amplificador operacional es infinita, la tensión en la entrada no inversora es igual a la tensión en la entrada inversora. Aplicando las leyes de circuitos, por ejemplo, utilizando el método de Kirchhoff la tensión de salida formará un divisor de tensión de valor:

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

SUMADOR INVERSOR

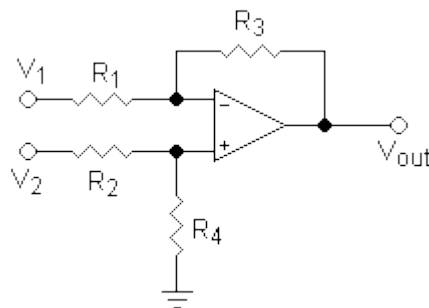
Similar al caso anterior. Ahora la entrada está por la entrada inversora. Además, suponemos un número cualquiera de resistencias de entrada.



Siguiendo las mismas reglas de cálculo:

$$V_{out} = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right)$$

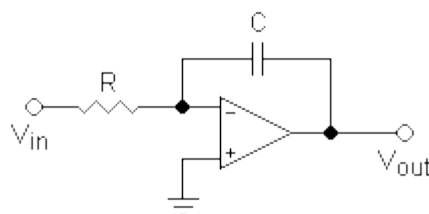
RESTADOR INVERSOR



Para resistencias independientes R_1, R_2, R_3, R_4 :

$$V_{out} = V_2 \left(\frac{(R_3 + R_1) R_4}{(R_4 + R_2) R_1} \right) - V_1 \left(\frac{R_3}{R_1} \right)$$

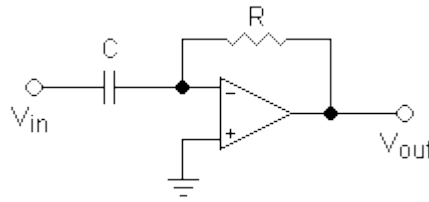
INTEGRADOR IDEAL



Con este circuito calculamos el valor de la integral (con signo invertido) del valor de la tensión de entrada. Esta tensión puede, lógicamente, ser variable.

$$V_{out} = \int_0^t -\frac{V_{in}}{RC} dt + V_{inicial}$$

DERIVADOR IDEAL

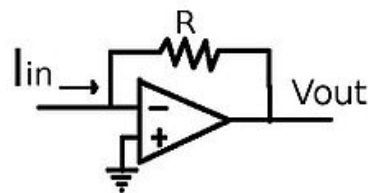


Deriva e invierte la señal respecto al tiempo

$$V_{out} = -RC \frac{dV_{in}}{dt}$$

En la práctica estos circuitos no se pueden implementar utilizando electrónica discreta. El condensador del integrador acaba cargándose con la corriente continua del circuito y se satura. Por otra parte el derivador amplifica más las señales de alta frecuencia y termina amplificando mucho el ruido.

CONVERSOR DE CORRIENTE A VOLTAJE



El convertor de corriente a voltaje, se conoce también como *Amplificador de transimpedancia*. Cuando se aplica a la entrada una corriente (I_{in}), la transforma en un voltaje proporcional a ésta.

Si utilizamos una resistencia de valor R como factor de proporcionalidad, la relación resultante entre la corriente de entrada y el voltaje de salida es:

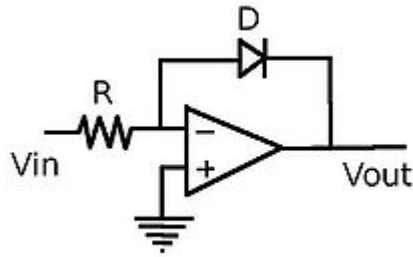
$$V_{out} = -R \cdot I_{in}$$

En la práctica se utiliza en sensores de corriente con valores típicos de 0 a 20 mA. Acoplamos este circuito a la salida y obtenemos una tensión proporcional a la corriente de entrada con un valor lo suficientemente elevado (en función de R) para poder ser procesada.

FUNCIÓN EXPONENCIAL Y LOGARÍTMICA

El logaritmo y su función inversa, la función exponencial, son ejemplos también de configuraciones no lineales, las cuales aprovechan el funcionamiento exponencial

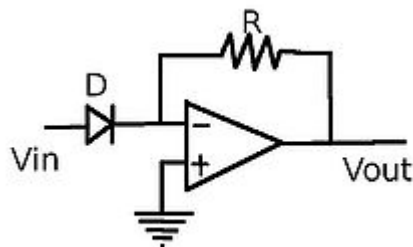
del diodo, logrando una señal de salida proporcional al logaritmo o a la función exponencial a la señal de entrada.



La señal de entrada genera una corriente proporcional (valor de proporcionalidad, R) a su logaritmo en el diodo que será la tensión de salida v_{out} .

$$V_{out} = -R \ln \frac{V_{in}}{R}$$

Para conseguir la función exponencial, simplemente se cambia la posición del diodo y de la resistencia. El resultado es:



$$V_{out} = -R \cdot e^{V_{in}}$$

En la práctica, la realización de estas funciones en un circuito son más complicadas de construir, y en vez de usarse un diodo se usan transistores bipolares, para minimizar cualquier efecto no deseado, como es, sobre todo, la temperatura donde se trabaja. No obstante, queda claro que el principio de funcionamiento de la configuración queda inalterado.

PROCESADOR ANALÓGICO CON CONTROL DIGITAL

El principal problema a la hora de implementar estos circuitos, como se dijo, es el uso de componentes discretos. Actualmente es posible realizar estos circuitos utilizando integración a gran escala ya que los problemas que surgen en la electrónica discreta quedan anulados utilizando tecnología integrada.

Principalmente, los condensadores se sustituyen por transistores MOS en los que la puerta y el canal forman un condensador que puede, además, ser variable o un varicap polarizado en inverso. Por su parte, las resistencias se sustituyen por *memristor*, que se analizarán posteriormente.

Los problemas técnicos que surgieron en los años setenta y ochenta para la realización de ordenadores analógicos han quedado superados, tan sólo nos falta implementar un sistema de procesador analógico que pueda ser programable como uno digital. Esto es posible combinando la rapidez y sencillez de la electrónica digital con la exactitud y facilidad para realizar operaciones matemáticas complejas de la analógica.

Supongamos que deseamos realizar un circuito-procesador que sea capaz de realizar varias operaciones matemáticas en tiempo real. Para ello podemos disponer de varios de los circuitos expuestos anteriormente, pero sólo se activará el circuito correspondiente a la operación que necesitamos realizar en cada momento. Esta selección de operaciones, o de circuito, se puede realizar utilizando un decodificador digital que active la alimentación del AO que necesitemos. De esta forma podemos utilizar instrucciones digitales para decodificar la operación y procesamiento analógico para conseguir rapidez y exactitud.

El circuito podría ser como el siguiente:

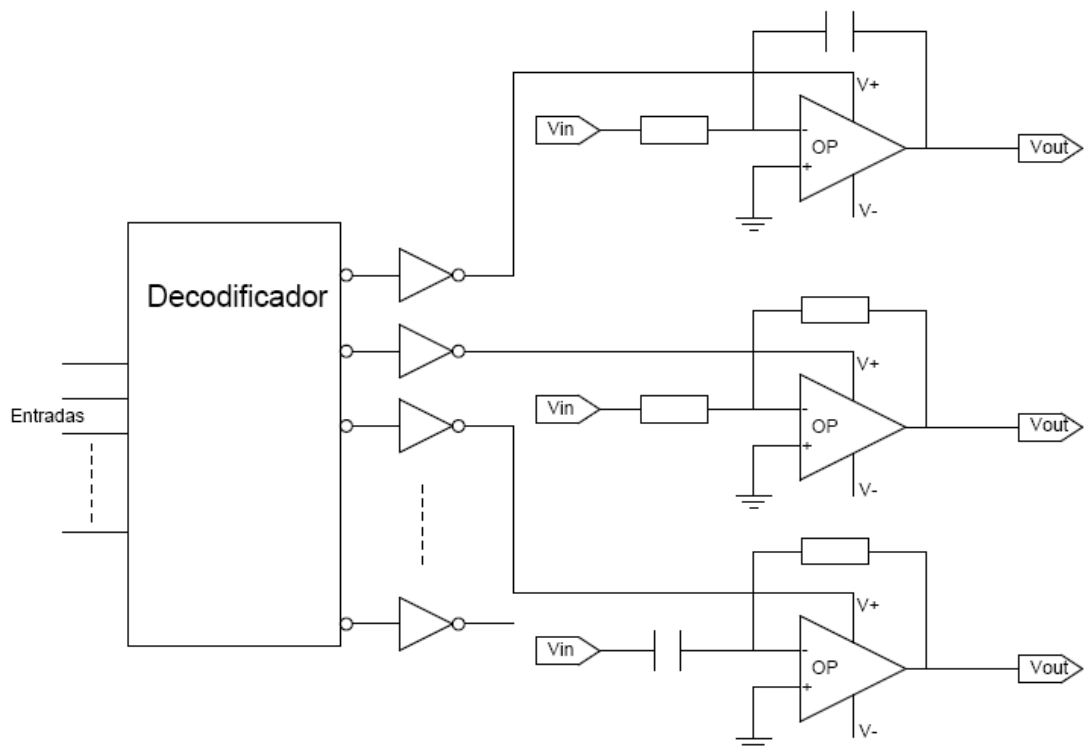


Figura 5. Procesador analógico básico con control digital.

Cada combinación de ceros y unos en las entradas digitales del decodificador correspondería con una operación matemática que realizará el procesador analógico. Ese sería el operador en una instrucción digital. El operando o parámetros que necesitamos para realizar el cálculo se introduciría mediante tensiones continuas que modificarían el valor de las *memristor* y de los condensadores que podrían estar formado por varicap o transistores MOS.

De esta forma la programación de este tipo de procesadores seguiría, en todo momento, los estándares que se utilizan para programar los procesadores digitales.

Es fácil realizar un proceso más complejo en el que se necesiten más unidades de cálculo, por ejemplo, cuando es necesario realizar más de una operación matemática por instrucción, simplemente repitiendo este mismo esquema el número de veces que se considere necesario.

En la siguiente figura se puede ver el esquema de bloques para dos operaciones, que, lógicamente, puede extenderse a más operaciones.

De entre todas las salidas de decodificador dejaremos la última sin operación, que irá conectada directamente a la V_{out} , con el fin de poder realizar operaciones o parte de ellas, nulas.

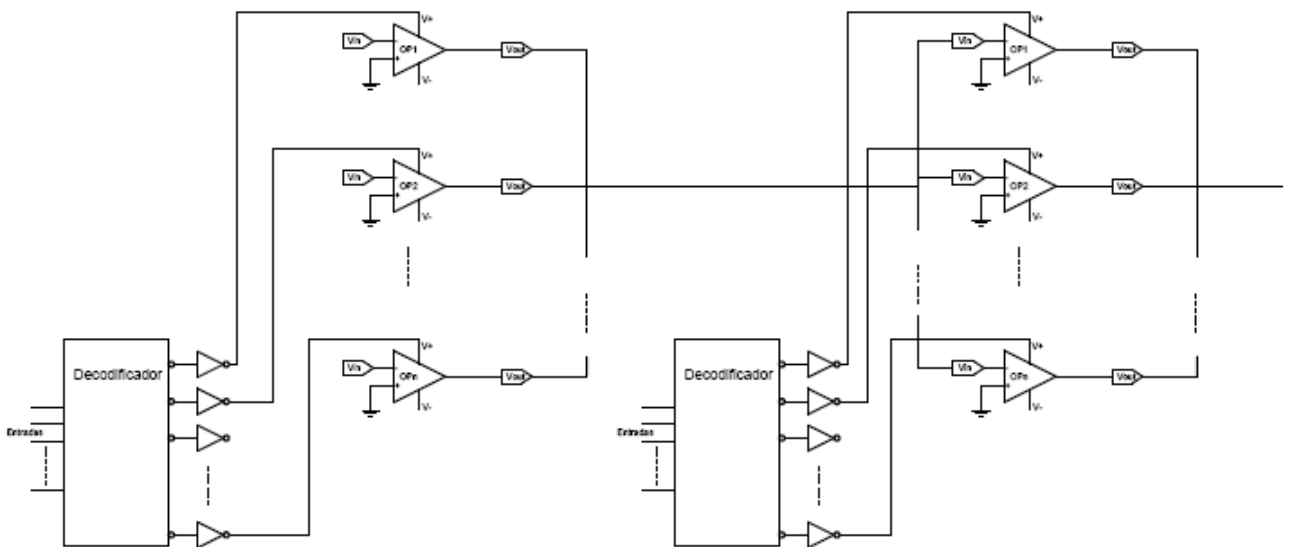


Figura 6. Procesadores analógicos en cascada.

MEMRISTOR

Los elementos pasivos de los circuitos eléctricos conocidos son el condensador, la resistencia y la inductancia. Se definen como relación de dos de las cuatro variables eléctricas fundamentales: corriente, voltaje, carga y flujo magnético.

Con estas cuatro variables relacionadas dos a dos se pueden obtener seis posibles combinaciones. Las dos primeras relacionan la corriente con la carga y la tensión con el flujo:

$$i = \frac{dq(t)}{dt}$$

$$v = \frac{d\varphi(t)}{dt}$$

De la definición de los tres elementos básicos en teoría de circuitos se obtienen otras tres combinaciones:

Resistencia: $dV = R di$

Inductor: $d\varphi = L di$

Condensador: $dq = C dv$

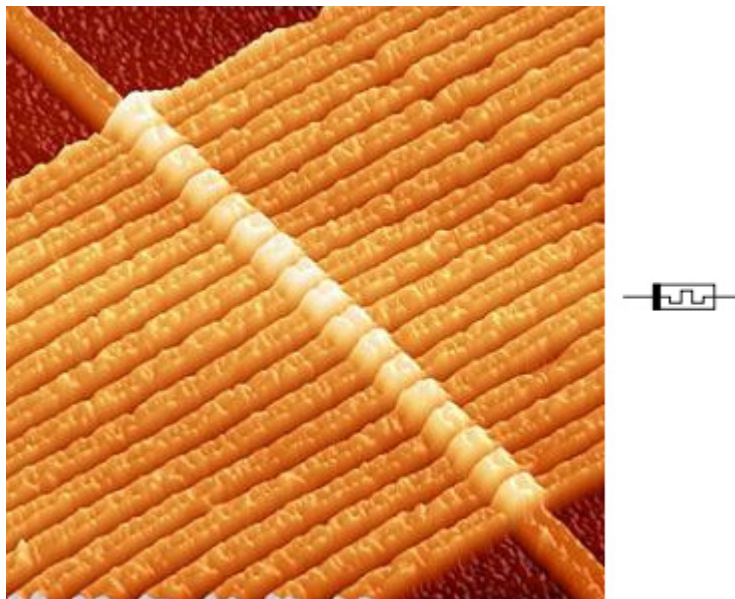


Figura 7. Imagen de un circuito con 17 memristores desarrollado por la multinacional HP y símbolo eléctrico del memristor.

Falta la relación entre el flujo y la carga.

LeoChua de la Universidad de California Berkeley predijo, en 1971, este cuarto elemento que denominó *memristor* y que cumple la relación:

$$d\varphi = M dq$$

Un memristor es capaz de almacenar información, porque el nivel de su resistencia eléctrica cambia cuando es aplicada la corriente. De esta forma, controlando la corriente, los datos pueden ser guardados y reescritos.

Durante 37 años, el memristor fue un dispositivo hipotético, sin ejemplos físicos. En abril de 2008, una implementación física del memristor fue divulgada en Nature por un equipo de investigadores de HP Labs de la multinacional Hewlett Packard.

FUTURAS APLICACIONES

Con la implementación de los memristor la electrónica y, sobre todo, la informática van a experimentar un avance más que significativo.

Los memristores pueden formar transistores, aunque son mucho más pequeños. Pero, sobre todo, pueden ser formados como memoria de estado sólido no volátil, que permitiría una mayor densidad de datos que los discos duros con tiempos de acceso similares a la DRAM, sustituyendo ambos componentes.

Como es un dispositivo analógico, no sólo podría almacenar bits ("1"s y "0"s), sino bytes o cadenas de bytes en el mismo espacio. Esto significa que, actualmente, para almacenar un dato necesitamos una serie de celdas de memoria que para un número en coma flotante, por ejemplo, es de 32 bits. Utilizando los memristor, sólo haría falta un memristor para ese mismo dato. Con este sistema, el tamaño de almacenamiento de las memorias aumentaría 32 veces.

Para el desarrollo de un futuro procesador analógico el memristor facilitaría la labor de programar el valor de las resistencias en los AO de los calculadores, por lo que su implementación se podría realizar con relativa sencillez y su programación seguiría los estándares que se utilizan actualmente para los procesadores digitales.

Si queremos mantener y mejorar sucesivamente nuestro nivel tecnológico debemos buscar nuevos sistemas electrónicos. No basta con reducir la escala de integración o buscar materiales más eficaces a nivel microscópico, necesitamos reinventar la microelectrónica para reinventar el futuro.

El procesador analógico es sólo una idea. Pero lo importante no es sólo la idea, sino la mentalidad de los años en los que se buscaba realizar una máquina de cálculo automático sin saber muy bien a dónde nos podría llevar esa máquina. Necesitamos reinventar el ordenador.