

computadora analógica – analog computer

Authored by
memjavad

October 25, 2025

RECOMMENDED CITATION

memjavad (2025). *computadora analógica – analog computer*. Spanish Psychological Databases. Retrieved from <https://spanish.arabpsychology.com/?p=1570>

Computadora Analógica

Primary Disciplinary Field(s): Ingeniería Eléctrica, Informática, Física Aplicada, Sistemas de Control.

1. Definición Central

La **computadora analógica** se define fundamentalmente como un tipo de máquina de cálculo que utiliza fenómenos físicos continuos, como cantidades eléctricas (voltaje, corriente), mecánicas (posición, velocidad) o hidráulicas (flujo, presión), para representar datos y realizar operaciones matemáticas. A diferencia de las computadoras digitales, que operan con información discreta codificada en binario, las computadoras analógicas modelan el problema a resolver mediante una analogía directa entre las variables del sistema físico y las variables del problema matemático. Este enfoque inherente permite que el sistema físico, al evolucionar en el tiempo, simule el comportamiento de otro sistema, típicamente descrito por ecuaciones diferenciales o integrales, sin la necesidad de discretización.

Históricamente, estas máquinas fueron cruciales para resolver problemas complejos de ingeniería y ciencia que eran intratables para los métodos manuales o mecánicos de la época. Su característica distintiva reside en que la precisión de la solución no depende del número de dígitos o bits, sino de la fidelidad con la que los componentes físicos (resistores, capacitores, amplificadores operacionales, en el caso electrónico) representan las constantes y relaciones matemáticas del problema. Por ejemplo, una resistencia puede representar una constante de proporcionalidad, y un condensador, una integración temporal. La manipulación de estas cantidades físicas continuas proporciona una solución en tiempo real, lo que las hacía excepcionalmente valiosas en simulaciones dinámicas y sistemas de control.

Es importante recalcar que la salida de una computadora analógica es típicamente una representación continua, a menudo mostrada en osciloscopios o graficadores, y no una serie de dígitos. Esto contrasta marcadamente con la salida de una computadora digital, que proporciona resultados numéricos exactos basados en la lógica booleana. Aunque su uso disminuyó drásticamente con el auge de la computación digital, los principios analógicos siguen siendo fundamentales en campos específicos, especialmente en la computación neuromórfica y ciertos tipos de procesamiento de señales, donde la inmediatez y el bajo consumo energético son prioritarios.

2. Principios de Funcionamiento

El principio operativo central de la **computadora analógica** se basa en el mapeo isomorfo de las variables matemáticas a variables físicas mensurables. Para resolver una ecuación diferencial, por ejemplo, el sistema se configura de tal manera que las leyes físicas que rigen el circuito o

mecanismo (como las leyes de Kirchhoff en la electrónica o las leyes de Newton en la mecánica) replican la estructura formal de la ecuación. Los componentes individuales del sistema analógico actúan, por lo tanto, como operadores matemáticos fundamentales.

En las máquinas electrónicas, que se convirtieron en el estándar de la industria a mediados del siglo XX, los componentes clave incluyen el **amplificador operacional** (op-amp), que es esencial para realizar sumas, restas e inversión de signo; los resistores y condensadores, que se combinan para realizar la operación de integración (la operación fundamental en la resolución de ecuaciones diferenciales); y los multiplicadores, que permiten el producto y la división de variables. La interconexión de estos componentes, a menudo mediante tableros de conexión (patch panels), permite al operador "programar" la máquina para resolver un conjunto particular de ecuaciones. Este proceso de programación es, en esencia, la construcción de un circuito que obedece a las mismas relaciones matemáticas que el sistema modelado, estableciendo una correspondencia directa entre la topología del circuito y la estructura de las ecuaciones.

Un aspecto crucial del funcionamiento analógico es su velocidad intrínseca. Dado que la solución se desarrolla simultáneamente en todos los componentes del sistema, el procesamiento es inherentemente paralelo. La velocidad de cálculo está limitada únicamente por la física de los componentes utilizados, como la velocidad de respuesta del amplificador operacional. Esto confiere a las computadoras analógicas una ventaja significativa en la simulación de sistemas en tiempo real o más rápidos que el tiempo real, particularmente aquellos que involucran dinámica continua, como la trayectoria de un misil o la simulación de fenómenos meteorológicos. La solución no se calcula paso a paso mediante iteraciones discretas, sino que se manifiesta como la evolución natural y continua del sistema físico modelado.

3. Etimología y Desarrollo Histórico

El concepto de utilizar una analogía física para el cálculo es milenario, remontándose a la invención de dispositivos tempranos de medición y predicción, como el **astrolabio** o el [mecanismo de Anticitera](#). Sin embargo, el término "computadora analógica" como tal se consolidó en el siglo XX. Los precursores directos de la computación analógica moderna surgieron con la invención de la regla de cálculo en el siglo XVII, que utilizaba longitudes para representar logaritmos y realizar multiplicaciones y divisiones. No obstante, el verdadero desarrollo de máquinas capaces de resolver ecuaciones diferenciales complejas comenzó con la ingeniería mecánica de precisión del siglo XIX.

Un hito fundamental en la historia moderna fue el [analizador diferencial](#), desarrollado por Vannevar Bush y sus colegas en el MIT en la década de 1930. Este dispositivo electromecánico utilizaba integradores de disco y esfera para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias, y fue crucial para la investigación balística, la ingeniería de redes eléctricas y el diseño de la

infraestructura de guerra. Este analizador demostró la viabilidad de la integración mecánica a gran escala. Durante la Segunda Guerra Mundial, el desarrollo de sistemas de control de fuego y radar impulsó la necesidad de dispositivos analógicos rápidos y precisos, muchos de los cuales eran computadoras analógicas especializadas que realizaban cálculos trigonométricos y balísticos en fracciones de segundo.

La edad de oro de la computación analógica se produjo entre 1950 y 1960, con la introducción de las **computadoras analógicas electrónicas** (EACs). Estas máquinas reemplazaron los componentes mecánicos voluminosos por circuitos electrónicos basados en amplificadores operacionales de alto rendimiento, logrando mayor velocidad, menor costo y mayor portabilidad. Compañías como EAI (Electronic Associates, Inc.) y PACE produjeron modelos comerciales que se convirtieron en herramientas estándar en universidades, laboratorios aeroespaciales (como la [NASA](#)) e industrias químicas. Sin embargo, el rápido avance en la tecnología de semiconductores, que mejoró exponencialmente la velocidad, la capacidad de memoria y, crucialmente, la precisión y el costo de la computación digital a finales de la década de 1960 y principios de la de 1970, llevó al rápido declive y la eventual obsolescencia de la mayoría de las grandes máquinas analógicas de propósito general.

4. Características Clave

La distinción operativa y funcional entre la computación analógica y digital se basa en varias características fundamentales, principalmente relacionadas con la representación de datos, la precisión y el método de procesamiento.

Representación Continua de Variables: Los datos se representan mediante magnitudes físicas que varían continuamente (voltaje, longitud, ángulo). No existe la cuantificación ni la discretización de las variables; el dominio de la solución es infinitamente denso.

Procesamiento Paralelo Masivo: Todos los operadores matemáticos (sumadores, integradores, multiplicadores) funcionan simultáneamente. Esta característica proporciona una ventaja de velocidad en la resolución de sistemas acoplados de ecuaciones diferenciales, ya que el tiempo de cálculo no escala linealmente con la complejidad del problema.

Precisión Limitada por el Hardware: La precisión de la solución está directamente ligada a la tolerancia, la estabilidad térmica y la calidad de los componentes físicos utilizados (la calidad de la resistencia, la capacitancia del condensador, la linealidad del amplificador). Esto impone un límite superior a la precisión alcanzable, que raramente supera los cuatro dígitos significativos, en contraste con la precisión ilimitada teórica de la computación digital.

Programación Mediante Cableado Físico: La configuración del problema (la "programación") implica la conexión física de los componentes funcionales mediante cables en un tablero de conexiones. Cambiar el problema requiere una reconfiguración física, lo que hace que el cambio de tarea sea lento y menos flexible que la programación de software digital.

Orientación a la Integración: La arquitectura es intrínsecamente adecuada para la integración y la simulación de sistemas dinámicos continuos descritos por ecuaciones diferenciales. La integración electrónica, realizada por un amplificador operacional y un condensador, es una operación estable y fundamental en el diseño de estas máquinas.

Esta dependencia intrínseca de la precisión del hardware fue históricamente su mayor debilidad cuando se enfrentó a la necesidad de alta precisión requerida por muchas aplicaciones científicas. Además, el mantenimiento y la calibración constante de los componentes eran tareas onerosas, lo que se sumó a las razones de su sustitución por la tecnología digital.

5. Tipos y Arquitecturas

Las computadoras analógicas se pueden clasificar según el medio físico utilizado para establecer la analogía matemática, abarcando desde sistemas puramente mecánicos hasta sistemas electrónicos avanzados.

Computadoras Analógicas Mecánicas: Utilizan componentes como engranajes, levas, barras y diferenciales para realizar operaciones. El ejemplo más famoso es el [Analizador Diferencial](#) de Bush. Estos sistemas son extremadamente robustos y precisos en su contexto mecánico, pero son lentos, grandes y difíciles de escalar o reconfigurar. Otros ejemplos incluyen los planímetros y los sistemas mecánicos de control de fuego.

Computadoras Analógicas Hidráulicas: Utilizan el flujo y la presión de fluidos para modelar problemas, especialmente aquellos relacionados con la hidráulica o la transferencia de calor. El [integrador de agua](#) (o "computadora de agua") de Vladímir Lukyánov es un ejemplo notable utilizado en la Unión Soviética para resolver ecuaciones de conducción de calor y problemas de ingeniería civil, aprovechando la analogía entre el flujo de agua y el flujo de energía o calor.

Computadoras Analógicas Electrónicas (EACs): El tipo más extendido y tecnológicamente avanzado. Utilizan el voltaje como la variable principal. Su arquitectura se basa en la interconexión de módulos funcionales estándar: amplificadores operacionales para sumar e integrar, potenciómetros para multiplicar por constantes, y circuitos de estado sólido para la multiplicación de variables. Estas máquinas son rápidas, relativamente compactas y se programan mediante paneles de conexión que permiten una rápida, aunque limitada, reconfiguración.

Computadoras Analógicas Híbridas: Desarrolladas en la década de 1960, estas máquinas representaron el intento más exitoso de prolongar la vida útil de la computación analógica. Combinaban la velocidad de los cálculos analógicos (integración y simulación dinámica) con la lógica de control, la memoria y la precisión de la computadora digital. El componente digital gestionaba la configuración, el muestreo de datos, la presentación de resultados y la lógica condicional, mientras que el analógico realizaba la integración rápida. Esta arquitectura fue crucial para el programa espacial, permitiendo simulaciones complejas que requerían tanto velocidad continua como capacidad de decisión lógica discreta.

En el panorama actual, el foco se ha desplazado hacia la **computación analógica a escala de chip**, buscando aprovechar el procesamiento ultrarrápido y el bajo consumo energético. Esto incluye el desarrollo de circuitos analógicos para la [computación neuromórfica](#), donde los circuitos imitan las sinapsis y neuronas biológicas, y los procesadores analógicos dedicados a tareas específicas como el procesamiento de señales en el borde (edge computing).

6. Aplicaciones Históricas y Contemporáneas

Históricamente, la **computación analógica** fue indispensable en áreas donde la dinámica del sistema era crítica y la velocidad de cálculo era una necesidad absoluta, a menudo antes de que las computadoras digitales pudieran alcanzar la velocidad necesaria.

Aeroespacial y Defensa: Fueron fundamentales en el diseño de aeronaves, la simulación de vuelo y, especialmente, en los sistemas de guía y control de misiles y cohetes. La [NASA](#) utilizó computadoras analógicas y luego híbridas extensivamente en el desarrollo de los programas Apolo y Gemini para modelar las trayectorias orbitales, la dinámica de reentrada y los sistemas de propulsión, ya que la simulación en tiempo real era esencial para la seguridad y el diseño.

Sistemas de Control de Procesos: Dispositivos analógicos electromecánicos y luego electrónicos se utilizaron ampliamente en la industria para el control automático de procesos industriales continuos, como la refinación de petróleo, la producción química y las centrales eléctricas. La naturaleza continua de los controladores analógicos (como los PID) los hacía ideales para estas tareas.

Ingeniería Eléctrica: Se emplearon para simular redes eléctricas complejas, resolviendo ecuaciones de estado transitorio y analizando la estabilidad de los sistemas de potencia mucho antes de que los métodos numéricos digitales fueran lo suficientemente rápidos.

Aunque el dominio digital es casi absoluto en el procesamiento de datos general, las aplicaciones contemporáneas de los principios analógicos están experimentando un renacimiento impulsado por la eficiencia energética y la necesidad de procesamiento de datos masivos en tiempo real:

Inteligencia Artificial y Computación Neuromórfica: Los circuitos analógicos, que pueden realizar multiplicaciones y acumulaciones de manera intrínsecamente paralela y con un consumo de energía significativamente menor que sus contrapartes digitales, están siendo explorados activamente para acelerar las operaciones de redes neuronales profundas (inferencia y entrenamiento) directamente en el hardware.

Procesamiento de Señales de Ultra Alta Frecuencia: En telecomunicaciones avanzadas y radar, los circuitos analógicos especializados pueden procesar señales de gigahertz de forma más eficiente que la conversión analógico-digital y el procesamiento digital subsiguiente, evitando el cuello de botella de la conversión.

Computación Cuántica Analógica: Más que una máquina de propósito general, los simuladores

cuánticos analógicos utilizan sistemas físicos controlables (como átomos ultrafríos o circuitos superconductores) para modelar y resolver problemas cuánticos que son intratables para las supercomputadoras digitales, aprovechando la analogía directa entre el sistema físico y el problema cuántico.

7. Limitaciones y Comparación con la Computación Digital

La limitación más crítica e insuperable de la **computadora analógica** es la **precisión**. Como se mencionó, la precisión está limitada por factores físicos inherentes al hardware: ruido térmico, la tolerancia de fabricación de los componentes, la deriva de voltaje debido a la temperatura y la dificultad de mantener una calibración perfecta. La precisión máxima práctica de las EACs comerciales se situaba típicamente entre 0.01% y 0.1%, lo que es insuficiente para cálculos científicos, financieros o criptográficos modernos que requieren una precisión extremadamente alta.

Adicionalmente, la **programabilidad** y la **flexibilidad** de las máquinas analógicas son inherentemente bajas. Dado que la programación es física (cableado), reconfigurar la máquina para un nuevo problema es un proceso laborioso y propenso a errores humanos. Las computadoras analógicas son, además, inherentemente menos adecuadas para problemas que requieren lógica compleja, almacenamiento de grandes bases de datos, manipulación de texto o procesamiento de bifurcaciones condicionales. La ausencia de la arquitectura de programa almacenado, que define la versatilidad de las máquinas digitales, restringe la computadora analógica a ser una excelente calculadora de propósito específico para ecuaciones diferenciales.

En contraste, la **computación digital** ofrece una precisión potencialmente ilimitada (limitada solo por el número de bits utilizados), una programabilidad flexible mediante software y una inmunidad casi total al ruido físico una vez que la señal se interpreta correctamente como un estado lógico discreto (0 o 1). Sin embargo, la computación digital debe discretizar el tiempo y las variables continuas para simular la dinámica, lo que introduce errores de truncamiento y requiere una potencia de cálculo inmensa para igualar la velocidad de simulación en tiempo real de su contraparte analógica. La principal fortaleza de la computación analógica reside precisamente en su capacidad de simular la física de forma continua e inmediata, evitando los pasos intermedios de discretización y logrando una eficiencia energética superior en problemas de simulación y optimización específicos.

8. Significado e Impacto

El impacto histórico de la **computadora analógica** no puede subestimarse, pues fue un pilar fundamental de la ingeniería y la ciencia durante la mitad del siglo XX. Antes de la supremacía digital, estas máquinas eran la única herramienta práctica para resolver sistemas de ecuaciones

complejos que eran cruciales para el avance de la ingeniería moderna, desde el diseño de aviones hasta la gestión de redes eléctricas y la balística. La capacidad de simular sistemas dinámicos en tiempo real permitió avances rápidos en la automatización y el control, sentando las bases para la ingeniería de sistemas moderna y la era espacial.

Aunque fueron eclipsadas por la versatilidad de las computadoras digitales de propósito general, su legado persiste en la teoría de control y en la comprensión de que no todos los problemas requieren o se benefician de la digitalización. El interés contemporáneo en la computación analógica subraya una tendencia hacia arquitecturas de hardware más especializadas y energéticamente eficientes. En la era del [Internet de las Cosas \(IoT\)](#) y la Inteligencia Artificial, donde la eficiencia energética y la respuesta ultrarrápida son críticas para dispositivos en el borde de la red, los principios analógicos ofrecen una ruta viable para el desarrollo de dispositivos de muy bajo consumo que pueden procesar grandes flujos de datos sensoriales de manera inmediata.

En última instancia, la computadora analógica representa un paradigma fundamental y alternativo al procesamiento discreto de datos. Su resurgimiento en nichos de alto rendimiento y bajo consumo energético demuestra que la naturaleza continua de la realidad puede ser explotada directamente para el cálculo, cerrando el ciclo con la computación digital en arquitecturas híbridas avanzadas que buscan combinar lo mejor de ambos mundos: la precisión y lógica del digital con la velocidad y eficiencia del analógico.

9. Lecturas Adicionales

[Computadora analógica - Wikipedia en español](#)

[Analog computer - Wikipedia \(English\)](#)

[Analizador Diferencial \(Vannevar Bush\) - Wikipedia](#)