

# Introducción

*Ingeniería Electrónica de Comunicaciones*

Eva Besada Portas

Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática.  
Universidad Complutense de Madrid

Curso 2020-2021

## Esquema



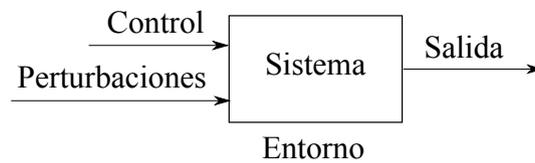
- 1 **Objetivos**
- 2 Tipos de control
- 3 Componentes básicos
- 4 Realización practica
- 5 Revisión histórica
- 6 Análisis de la respuesta de sistemas lineales



- Comprender la utilidad del control y de la realimentación dentro del área de la ingeniería
- Conocer los conceptos e ideas claves de los sistemas dinámicos y de la realimentación
- Conocer los elementos matemáticos necesarios para el análisis y el diseño de controladores
- Ser capaz de resolver problemas de control sencillos
- Reconocer cuando un sistema es difícil de controlar
- Conocer las herramientas de diseño de controladores



- Cibernética: palabra griega que significa arte de gobernar una nave, tiene la misma raíz que gobernar, en latín gubernator.
- 1938 A. M. Ampere en "Essai sur la philosophie des science": La ciencia del gobierno debería denominarse "la cybernétique".
- 1948 N. Wiener. "La ciencia del control y las comunicaciones en los animales y las máquinas".
- En los países occidentales la palabra ha sido sustituida de forma gradual por control.
- A.L. Fradkov. Cibernética física: control de sistemas caóticos y control cuántico.
- La Automática, según la RAE, es la ciencia que trata de sustituir en un proceso el operador humano por dispositivos mecánicos o electrónicos. El control es uno de sus elementos, formando parte de ella también la electrónica, mecánica, computación, comunicación, etc.



El **objetivo principal** del control es conseguir que las salidas de un sistema dinámico evolucionen de un modo adecuado para unas entradas de control determinadas, a pesar de las perturbaciones existentes.

El concepto de sistema nos permite abstraernos del problema que deseamos resolver. Su dinámica implica que la respuesta cambia a lo largo del tiempo según su estado (condiciones) inicial, el valor de la entrada y las perturbaciones



La teoría de control de sistemas se centra en la resolución de cuatro problemas básicos:

- 1 **Modelado:**
  - ▶ Obtención del modelo matemático que represente al sistema
  - ▶ Plasmar por medio de un conjunto de ecuaciones el comportamiento del sistema
- 2 **Análisis:**
  - ▶ Herramientas sistemáticas de análisis
  - ▶ Simulaciones: comportamiento del modelo
  - ▶ Experimentos: comportamiento del sistema
- 3 **Estimación:**
  - ▶ De los parámetros del sistema
  - ▶ Se realiza de forma simultánea a la etapa anterior
- 4 **Control óptimo:**
  - ▶ Obtención de la ley de control que haga que el sistema se adapte “mejor” a los objetivos deseados
  - ▶ Análisis del sistema completo mediante simulación, y posible construcción de un prototipo para realizar pruebas.



Un **modelo** es una representación de un **sistema** para unas determinadas condiciones.

*Ejemplo:*



Figura: Sistema

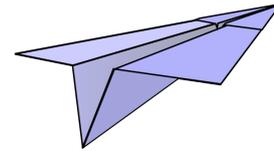


Figura: Modelo 1

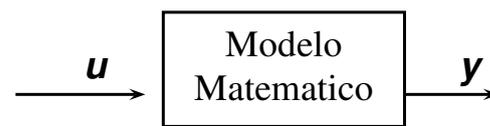


Figura: Modelo 2

La calidad del modelo resultad fundamental a la hora de diseñar el controlador.

## Esquema



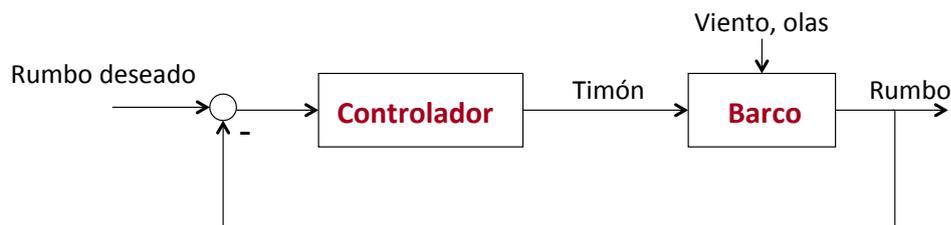
- 1 Objetivos
- 2 Tipos de control
- 3 Componentes básicos
- 4 Realización practica
- 5 Revisión histórica
- 6 Análisis de la respuesta de sistemas lineales



## Control en lazo abierto



## Control en lazo cerrado



- **Sistema de control en lazo abierto:** la salida del proceso no influye en la acción de control
- **Sistema de control en lazo cerrado:** la salida del sistema se compara con la señal de referencia y el resultado de la comparación se usa como entrada del controlador → Realimentación

# Realimentación I



- Idea: comparar el resultado actual con el valor deseado
- Usar la diferencia para realizar acciones
- Esta sencilla idea es tremendamente poderosa, ya que produce una transmisión circular de la información
- La realimentación es la idea fundamental del control
- Presente en todos los campos: ingeniería, biología, física, sistemas sociales, ecológicos, económicos, etc
- Multidisciplinar (la introducción de la realimentación ha producido cambios revolucionarios en algunas disciplinas)
- Convergencia de las tecnologías de control, comunicaciones y computadores



La realimentación, fundamental en control, aparece de forma natural en los seres vivos.

Algunos ejemplos son:

- Procesos visuales
- Regulación de la pupila
- Temperatura interna de los seres vivos
- Concentración de glucosa en sangre
- Regulación de la respiración

“Evolution is chaos (randomness) with feedback”. Joseph Ford. What is chaos, that should be mindful of it?. In *The New Physics*. Cambridge University Press, 1989

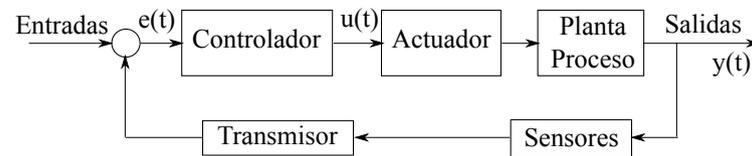


- 1 Objetivos
- 2 Tipos de control
- 3 Componentes básicos**
- 4 Realización practica
- 5 Revisión histórica
- 6 Análisis de la respuesta de sistemas lineales

# Componentes básicos I



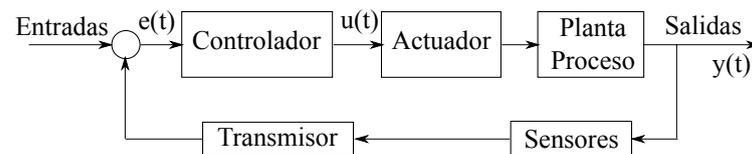
El control necesita de sistemas de medida, de actuación y algoritmos que transforma la medida en actuaciones



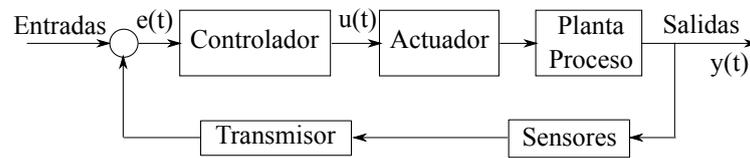
Los componentes básicos de un sistema de control son:

- **Proceso o planta:**
  - ▶ Sistema que se desea controlar
- **Controlador:**
  - ▶ Elemento encargado de conseguir que la salida de la planta tenga el comportamiento deseado
  - ▶ Recibe una señal de entrada  $e(t)$  y determina la señal de control  $u(t)$  necesaria para que la salida  $y(t)$  evolucione de forma adecuada.

# Componentes básicos II



- **Sensores:** Elementos físicos encargados de recibir las señales de los valores de los estados de la planta.
- **Transmisor:** Recibe las señales de los sensores, las transforman y las transmiten.
- **Comparador (círculo):** Compara las señales de entradas y las medidas transmitidas de las salidas, y genera la señal de error  $e(t)$  (entrada del controlador).
- **Actuador:** Aplica las señales de control  $u(t)$  sobre la planta.



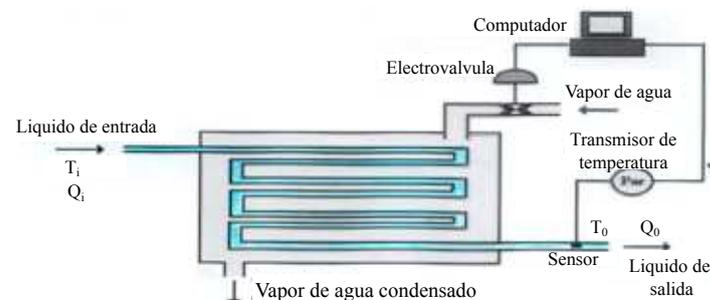
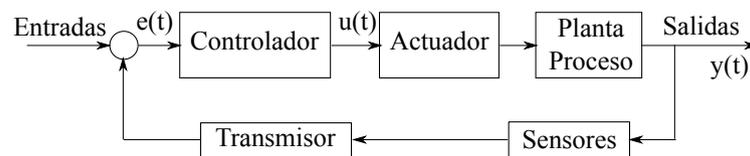
Con estos elementos se efectúan diferentes operaciones sobre el sistema:

- **Medición:**
  - ▶ La medida de la salida del proceso de la variable que se desea controlar la hacen entre el sensor y el transmisor.
- **Decisión**
  - ▶ El controlador debe decidir lo que hay que hacer para conseguir que la salida tenga el valor deseado.
- **Actuador:**
  - ▶ El actuador ejecuta la acción decidida.

## Ejemplo



*Control de la temperatura a la salida de un deposito utilizando vapor de agua.*





- 1 Objetivos
- 2 Tipos de control
- 3 Componentes básicos
- 4 Realización practica**
- 5 Revisión histórica
- 6 Análisis de la respuesta de sistemas lineales

## Realización practica I



A la hora de desarrollar e implementar un sistema de control se llevan a cabo los siguientes pasos:

- 1 Definición de las especificaciones - experto**
  - ▶ Estabilidad
  - ▶ Respuesta relativamente rápida
  - ▶ Amortiguación adecuada
  - ▶ Error en el estacionario apropiado
- 2 Análisis:**
  - ▶ Es el estudio, bajo condiciones específicas que se imponen, del funcionamiento del sistema.
  - ▶ Hay que conocer el modelo matemático.
  - ▶ El análisis debe comenzar por una descripción matemática de cada componente y luego del sistema completo.



### 3 Diseño de la ley de control

- ▶ Se tienen que cumplir las especificaciones fijadas.
- ▶ En sistemas complicados se suele determinar dicha ley mediante una computadora

### 4 Evaluación:

- ▶ Es necesario comprobar que se cumplen los objetivos fijados.
- ▶ Se suele hacer mediante una simulación (en una computadora o sobre un prototipo).
- ▶ Si no se cumple algún objetivo, regresar a algún punto de realización previo.

### 5 Realización:

- ▶ Si se cumplen los objetivos, se implementa el controlador sobre el sistema real.



1 Objetivos

2 Tipos de control

3 Componentes básicos

4 Realización practica

5 Revisión histórica

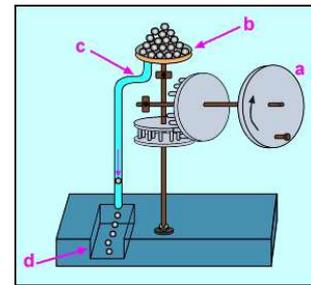
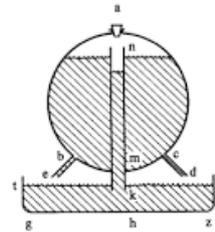
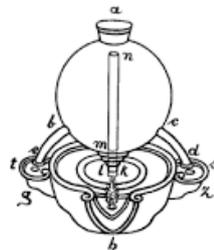
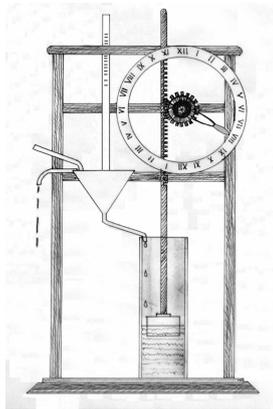
6 Análisis de la respuesta de sistemas lineales

# Revisión histórica: Prehistoria I



300AC-1200DC: automatismos básicos para medir y empezar a controlar el funcionamiento de molinos

- 270AC Clepsydra (ladrón/reloj de agua) de Ktesibios
- 250AC Lámpara de aceite Filon de Bizanzio
- 100AC Dispensador de vino y odómetro de Herón de Alejandría
- 800-1200 Clepsydras arabs
- 1200 H. U. Lansperg: sistema de control de alimentación de un molino de harina

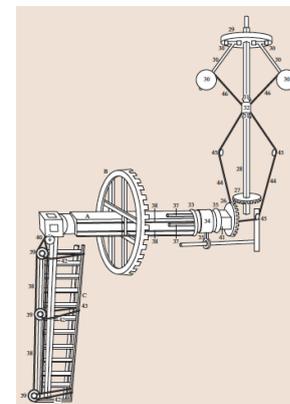
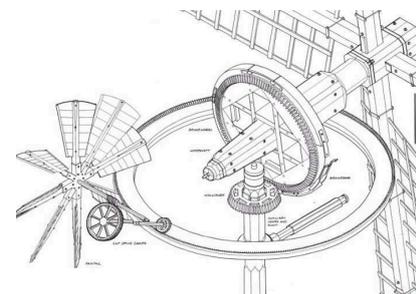


# Revisión histórica: Prehistoria II



La revolución industrial y sus antecedentes

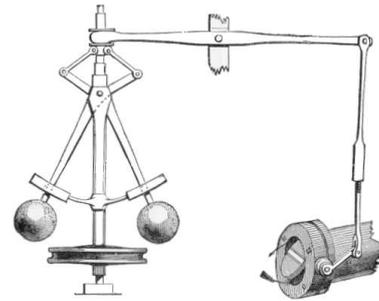
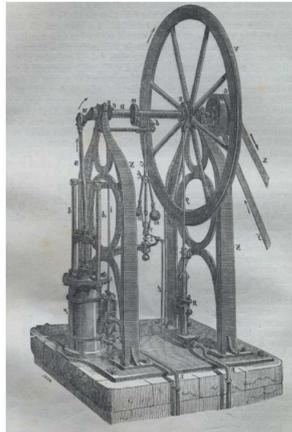
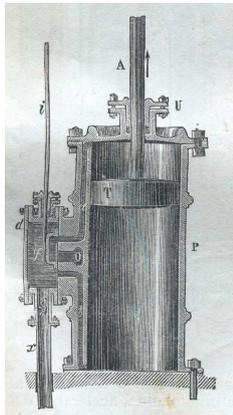
- 1624 C. Drebbel: control automático temperatura para hornos e incubadoras (dilatación alcohol)
- 1712 T. Newcomen: Primera máquina de vapor (desarrollo tecnológico que transformación de la energía del vapor de agua en energía mecánica)
- 1745 E. Lee: Molinillo de cola de los molinos de viento para su reorientación automática
- 1786 Máquina de vapor de Watt (mejora el rendimiento, introduce el vapor por ambas lados del émbolo)
- 1787 T. Mead regulador de la presión sobre el grano en molinos de viento (uso del péndulo rotatorio como sensor de velocidad y regulación del ángulo de ataque de las aspas)
- 1788 J. Watt: Diseño final del regulador centrífugo



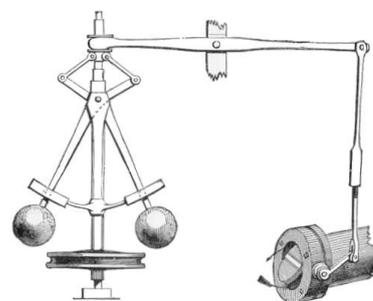
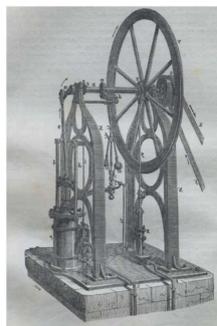
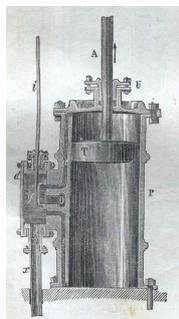


- **Regulador centrifugo de J. Watt:** diseñado para el control de la velocidad de una maquina de vapor, se considera el primer trabajo significativo de control automático

A velocidad constante de la maquina, si se introduce una carga en el tren, la velocidad disminuye y las bolas del péndulo cónico se juntan. Este movimiento de las bolas provoca un desplazamiento del manguito del regulador, que a su vez mueve la válvula de admisión de vapor en el émbolo y se contrarresta la velocidad perdida.

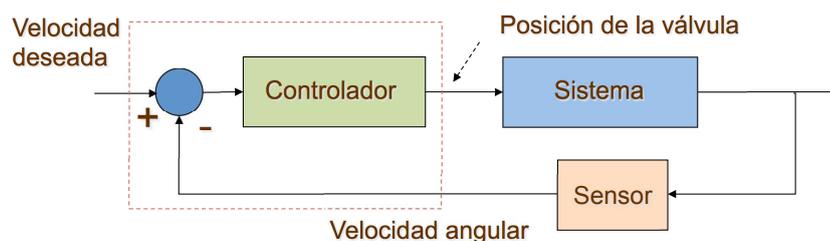


- **Regulador centrifugo de J. Watt:** sistema, sensor, regulador



Maquina de vapor: Sistema

Regulador Centrifugo:  
Sensor + Controlador



Criticas: único punto de operación, mantenimiento cuidadoso, tendencia a oscilar



### Trabajos de estabilidad de sistemas:

- 1840 G.B. Airy: regulación de la velocidad de telescopios
- **1868 'On Governors' de J.C. Maxwell:** primer estudio algebraico sobre la estabilidad de un sistema (determina la estabilidad de un sistema a partir de sus raíces para polinomios de  $n \leq 4$ )
- 1877 E.C. Routh presenta su criterio para determinar la estabilidad de un sistema
- 1889 Lyapunov, trabajos sobre la estabilidad de ecuaciones diferenciales no lineales
- 1898 Heaviside utiliza el cálculo variaciones para realizar estudios sobre el transitorio del sistema. Introduce la primera noción de función de transferencia.



### Desarrollo de aeroplanos y de las comunicaciones (amplificador operacional)

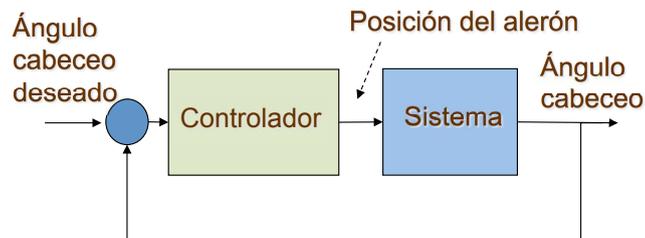
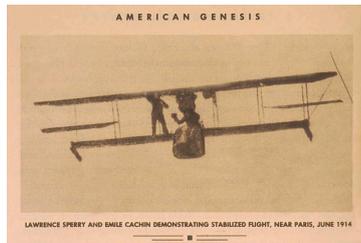
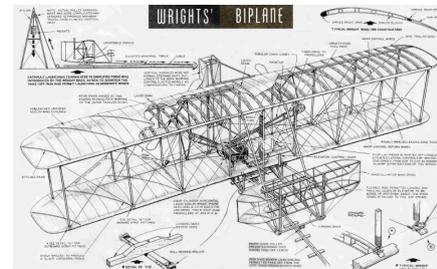
- **1903-05 Hermanos Wright: primer avión con controles**
- **1910-13 Sperry: primer giróscopo para navegación y avión giroestabilizado**
- 1922 Minorsky: primer controlador PID
- **1927 Black: amplificador operacional realimentado negativamente**
- 1932 Nyquist: criterio de estabilidad los sistemas en lazo cerrado a partir de la respuesta del sistema en lazo abierto a una entrada sinusoidal
- 1940 Bode: método para el desarrollo de amplificadores realimentados basados en la respuesta en frecuencia.
- 1942 Ziegler y Nichols: formulas empíricas para sintonizar el PID (de gran utilidad para sistemas complejos, no lineales y sujetos a retardos grandes entre el actuador y el sensor, como ocurre en los procesos industriales)
- **1945. La automática nace como disciplina**
- 1948 Shannon: Estudio de los procesos de muestreo y reconstrucción de señales con presencia de ruido.
- 1950 Evans. Técnica del lugar de las raíces para estudiar la estabilidad del guiado de aviones

## Revisión histórica: Periodo clásico II



Desarrollo de aeroplanos:

- Hermanos Wright patentan el primer sistema que controla/manipula las superficies de una máquina voladora
- Sperry construye el primer giróscopo para mantener/estabilizar la orientación de la aeronave

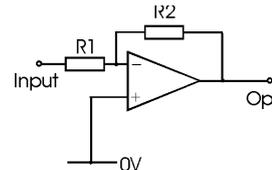
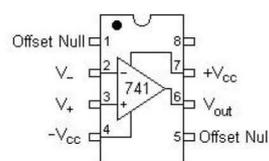
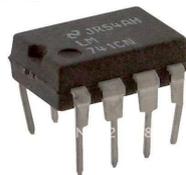


## Revisión histórica: Periodo clásico III



Desarrollo de las comunicaciones (telefonía a larga distancia) :

- Black, en los laboratorios Bell, descubrió que si una porción de la salida de un amplificador operacional se realimentaba en la fase negativa del amplificador, las distorsiones invertidas cancelarían las distorsiones introducidas por el amplificador. Para finales de 1927, el prototipo de Black conseguía una reducción en las distorsiones de 100.000 a 1 en el rango de 4 a 45 kHz.



Tardaron 9 años en concederle la patente, ya que los ingenieros no se creían que su idea pudiera funcionar. En 1957, cuando le concedieron una medalla por su invento se dijo: “No es exagerado decir, que sin el invento de Black la actual telefonía de larga distancia y la televisión que cubre todo nuestro país y la telefonía por cable transoceánica no existirían”

- El desarrollo del amplificador electrónico, y sus problemas de inestabilidad inherentes, hacen que Nyquist y Bode desarrollan sus trabajos



Con el desarrollo de la carrera espacial y de los computadores, se vuelven a considerar a las ecuaciones diferenciales como la herramienta básica para el estudio de los sistemas de control.

- 1955 Desarrollo de los métodos temporales. Nacimiento de la Teoría de Control Moderna. Representación de Sistemas en variables de estado
- 1957 Lanzamiento del Sputnik
- 1957 Bellman: aplicación de la programación lineal al problema del control óptimo de sistemas discretos.
- 1959 Jury, Ragazzini, Franklin: teoría clásica de los sistemas muestreados
- 1960-61 Kalman: desarrollo de los filtros de Kalman discreto y continuo
- 1964-66 Zames, Sandberg, Narendra: teoría de control no lineal
- 1969 Hoff: invención de microprocesador y desarrollo de la teoría de control digital

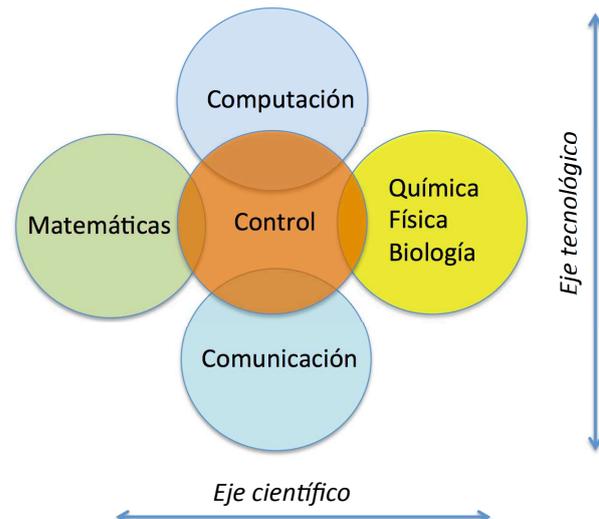


- **Control: tecnología transversal y oculta. Se pone de manifiesto cuando falla.**
- Es un elemento crítico en sus aplicaciones.
- Transporte: automóviles, aviones, barcos, satélites
- Automatización: electrodomésticos, generación y distribución de energía, industria de procesos, manufacturación discreta...
- Tecnología de consumo: cámaras, CDs, móviles
- Robótica: brazos de robot, robots autónomos
- Sanidad: cirugía asistida por robots
- Instrumentación
- Economía y Ciencias Sociales
- Biología (tratamiento de residuos, fermentadores, plagas, invernaderos, etc)

# Situación actual: Avances propios y transversales I



- Desarrollo de múltiples técnicas de control avanzado
  - ▶ Control óptimo
  - ▶ Control no lineal
  - ▶ Control adaptativo
  - ▶ Control robusto
  - ▶ Control inteligente
- Desarrollos transversal
  - ▶ Tecnológico: computación comunicaciones (retardos, arquitectura de control)
  - ▶ Científico: matemáticas, física, biología

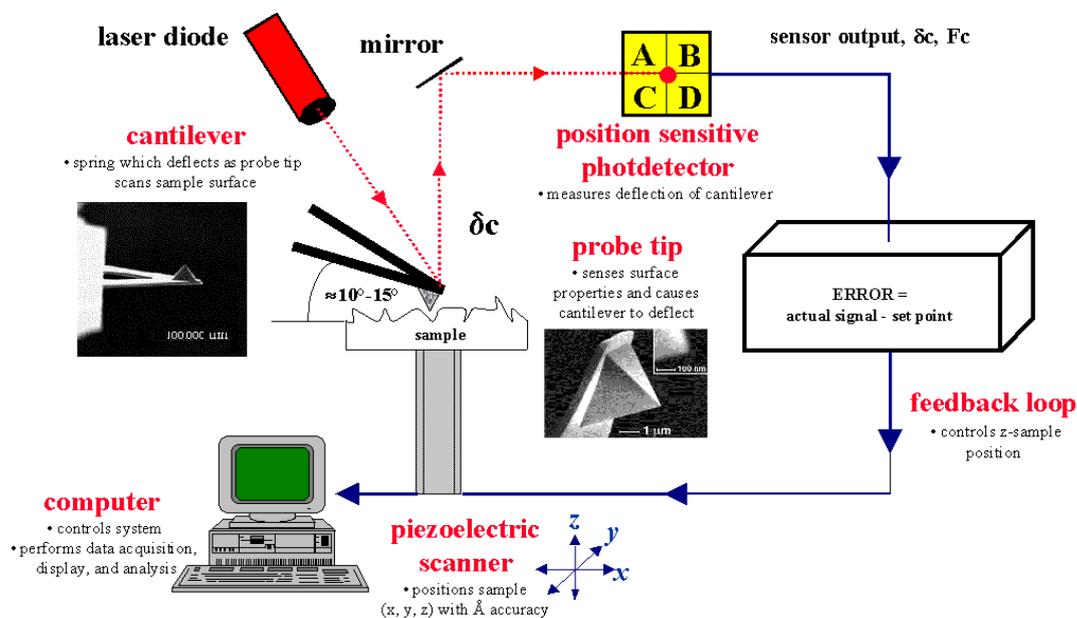


# Situación actual: Avances propios y transversales II



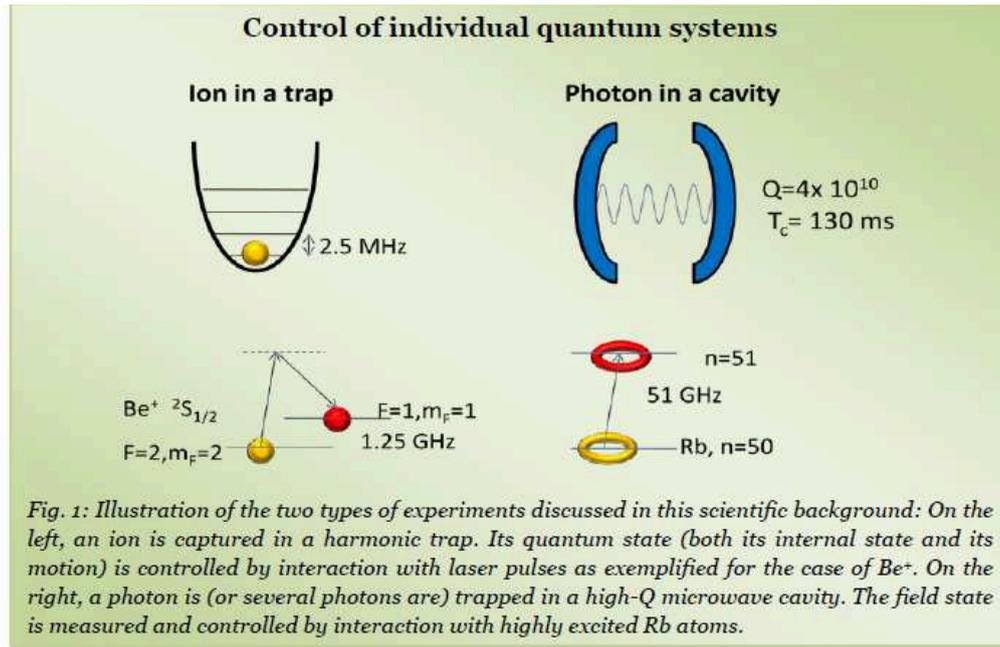
1986 Gerd Binnig, Heinrich Rohrer: Premio Nobel de Física

## *Atomic Force Microscopy (AFM) :* General Components and Their Functions





2010 Serge Haroche, David Wineland, Premio Nobel de Física por métodos experimentales que permiten la medición y manipulación de sistemas cuánticos individuales



## Cell Signaling

REVIEW

### Feedback Loops Shape Cellular Signals in Space and Time

Oren Brannman<sup>1</sup> and Tobias Meyer<sup>2</sup>

Positive and negative feedback loops are common regulatory elements in biological signaling systems. We discuss core feedback motifs that have distinct roles in shaping signaling responses in space and time. We also discuss approaches to experimentally investigate feedback loops in signaling systems.

Feedback loops are processes that connect output signals back to their inputs. The history of biological feedback goes back at least 130 years to observations by Eduard Pflüger that organs and other living systems “satisfy their own needs” (1). Feedback became an influential concept that led to Walter Cannon’s theory of physiological homeostasis (2), Alan Turing’s model of pattern formation (3), as well as investigations of metabolic end-product inhibition (4), metabolic oscillations (5), and transcriptional repression (6). Biological feedback concepts were further influenced by chemical oscillation theories (7) and the field of cybernetics (8). It has more recently become appreciated that the concept of feedback may be useful as a framework for understanding how intracellular signaling systems elicit specific cell behavior.

Mammalian species use over 3000 signaling proteins and over 15 thousand receptors to build hundreds of cell-specific signaling systems. Many of the signaling components have multiple upstream regulators and downstream targets, creating a web of connectivity within and between signaling pathways (9). The presence of multiple feedback loops in these systems (10) poses a challenge to understanding how receptor inputs control cellular behavior. We discuss how recurring feedback designs, or motifs (11), mediate biological functions such as bistability, oscillation, polarization, and robustness. Our goal

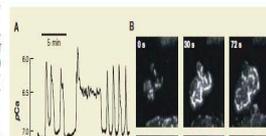
suggesting experimental approaches to investigate feedback loops.

#### Signaling with a Single Negative Feedback Loop

Negative feedback loops are found in nearly all known signaling pathways and are defined as sequential regulatory steps that feed the output signal, inverted, back to the input (Fig. 2A). Depending on its characteristics and initial conditions, a single negative feedback motif can create four distinct signaling functions: basal homeostasis, output limiter, adaptation, and transient generation.

The presence of a small-amplitude negative feedback loop stabilizes the basal signaling state without preventing strong input signals from triggering maximal pathway activation (Fig. 2A, basal homeostasis). In this case, small deviations of an input signal are suppressed in the output, and only large changes in the input control the output. For example, a negative feedback involving the endoplasmic reticulum (ER)  $\text{Ca}^{2+}$ -sensing protein STIM2 (stromal interaction molecule 2) (14) keeps basal  $\text{Ca}^{2+}$  concentration in the cytosol and in the lumen of the ER at  $\sim 50 \text{ nM}$  and  $\sim 400 \text{ nM}$ , respectively. STIM2 suggests influx of extracellular  $\text{Ca}^{2+}$  at ER-plasma membrane junctions in response to a reduction in ER  $\text{Ca}^{2+}$  concentration, forming a negative feedback loop (14). Because many cellular processes are regulated by  $\text{Ca}^{2+}$ , maintaining proper resting levels is crucial.

A different use of negative feedback is to limit maximum signaling output (Fig. 2A, limiter). Upon stimulation, the output signal rapidly increases but is attenuated once it passes a threshold. For example, receptor-triggered increases of





La Automática actual posee un cuerpo de doctrina (teórico y conceptual) bien establecido, se encuentra dotada de un amplio conjunto de métodos y procedimientos efectivos, y se aplica a un amplio y creciente conjunto de áreas de investigación. Los retos más importantes del futuro se encontraran en la:

- Elevada complejidad y heterogeneidad de sistemas
- Control en entornos de red asíncronos y distribuidos
- Coordinación de múltiples sistemas y autonomía de alto nivel
- Síntesis automática de algoritmos de control con verificación y validación integrada
- Construcción de sistemas muy fiables a partir de componentes menos fiables

Más información:

- Historia: <http://arri.uta.edu/acs/history.htm>
- Futuro: <http://www.cds.caltech.edu/murray/cdspanel/>



- 1 Objetivos
- 2 Tipos de control
- 3 Componentes básicos
- 4 Realización práctica
- 5 Revisión histórica
- 6 **Análisis de la respuesta de sistemas lineales**
  - Respuesta temporal
  - Respuesta en frecuencia



- 1 Objetivos
- 2 Tipos de control
- 3 Componentes básicos
- 4 Realización practica
- 5 Revisión histórica
- 6 Análisis de la respuesta de sistemas lineales**
  - Respuesta temporal
  - Respuesta en frecuencia



- 1 Objetivos
- 2 Tipos de control
- 3 Componentes básicos
- 4 Realización practica
- 5 Revisión histórica
- 6 Análisis de la respuesta de sistemas lineales**
  - Respuesta temporal
  - Respuesta en frecuencia