



Robótica y automatización

Sistemas embebidos

Instituto de Computación
Facultad de Ingeniería
Universidad de la República





UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Temas

- Introducción a los Sistemas Embebidos
- Cómputo
- Sensado
- Actuación





UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Sistemas Embebidos





¿Qué es un Sistema Embebido?

Sistemas computadores de propósito general

- Muchas aplicaciones, según el software que se instale.
- Hardware genérico.
- Hardware adicional opcional, a demanda.

Sistema embebido (SE):

- Sistema computador destinado a una aplicación en particular.
- Optimizados para su tarea.
- Combinación de hardware, software y posibles elementos mecánicos.





¿Qué es un Firmware?

Software de propósito general

- Altamente portable: hardware muy diverso
- Puede llegar a ser muy voluminoso
- Se actualiza frecuentemente
- Ecosistema con otro software (OS, bibliotecas)

Firmware

- Rutinas de software almacenadas en memoria no volátil (Flash, ROM, EEPROM, etc)
- Muy acoplado con un hardware particular
- Difícil o imposible de actualizar
- Es el único software en el dispositivo





UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Características de los sistemas embebidos

- Interactúan con el entorno
 - Directamente sensando y controlando señales.
 - Comunicándose con otros dispositivos.
- Interacción con restricciones de tiempo real.
- Recursos de cómputo limitados (RAM, CPU)
- Bajo consumo.





Entrada/Salida (E/S)

- Debido a su característica los sistemas embebidos deben interactuar con el ambiente que los rodea.
 - Sensando señales del ambiente
 - Actuando sobre el ambiente.
- Hay dos maneras de manejar la E/S:
 - Digital
 - Analógica





E/S Digital

- Los valores intercambiados son discretos (“unos” y “ceros”).
- Esos valores corresponden a voltajes de referencia. Por ejemplo:
 - $0V \rightarrow "0"$
 - $+3.3V \rightarrow "1"$
- Podemos leer estos valores en un pin de entrada y escribirlos en un pin de salida.
- Útil para controlar algunos dispositivos electrónicos. Por ejemplo:
 - Prender un LED.
 - Leer estado de un botón.
- Utilizado para implementar protocolos de comunicación. Por ejemplo:
 - Leemos voltajes a una velocidad acordada $\rightarrow 01000001_2 \rightarrow 65_{10} \rightarrow "A"_{ASCII}$





E/S Analógica_(1/2)

- Los valores que se intercambian pueden tomar valores continuos
- Al final el proceso es digital por lo que es necesario disponer de conversores:
 - Digital → Analógico (D/A)
 - Analógico → Digital (A/D).
- Un conversor A/D convierte un voltaje en un *pin de entrada* a un valor digital.
- La resolución del conversor condiciona la cantidad de valores a representar. Un canal de 10 bits va a permitir representar valores desde 0 a 1023.





E/S Analógica_(2/2)

- Un conversor D/A convierte un valor digital a un voltaje en un *pin de salida*.
- Muchos sensores se manejan de esta manera:
 - Temperatura, humedad, luz, micrófono
- Algunos actuadores se manejan de esta manera:
 - Parlantes, motores





UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Manejo de la E/S

Paradigmas para implementar la lectura/escritura de E/S:

- Polling: Donde se utilizan ciclos de CPU para estar constantemente consultando el valor de alguna entrada.
- Interrupciones: El CPU es notificado externamente. A nivel de software se ejecuta una rutina de atención a la interrupción.





Comunicación

Depende de estándares: especificaciones rigurosas que se deben respetar para una comunicación exitosa.

- Serial: un bit a la vez hasta formar una palabra (una línea)
 - RS232, SPI, I2C
- Paralela: todos los bits de la palabra a la vez (varias líneas)
- Hay muchos mecanismos de distintos niveles de complejidad y capacidades
 - USB, Wifi, Ethernet
- Algunos están implementados en el hardware, otros tenemos que implementarlos nosotros.
- Síncrona o asíncrona.
- Redes de dispositivos.





UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

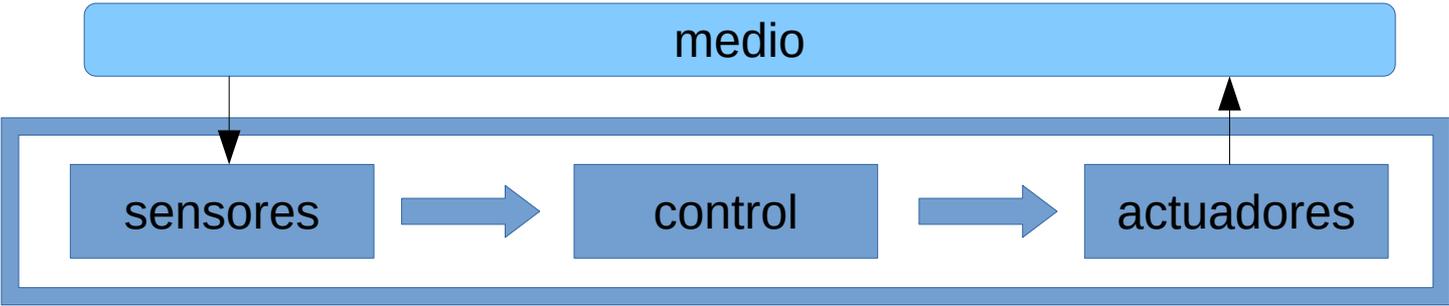
SE en la facultad

- Identifique un SE implantado en facultad
- Propongan SE a desarrollar en el marco del taller.



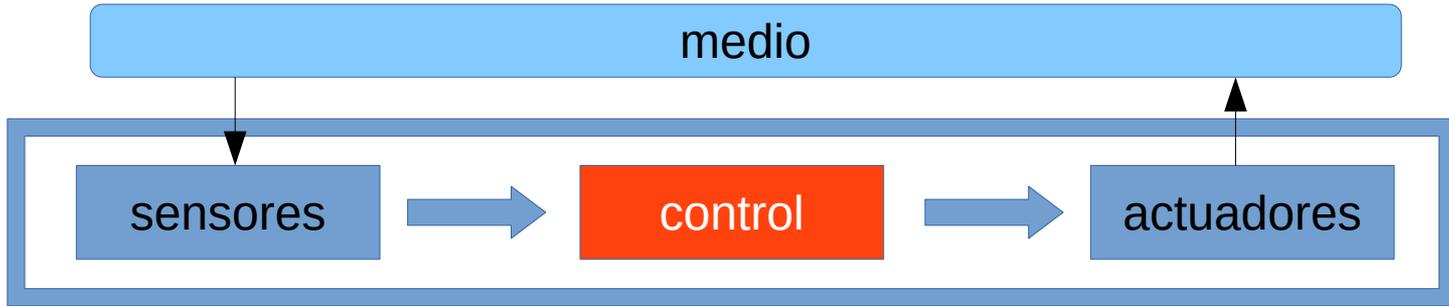


Modelo Agente-Entorno





Plataformas de cómputo





UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Microcontroladores





Plataformas de cómputo 1/2

Microprocesador

- Costo \geq mediano
- Recursos \geq mediano
- Memorias medianas a grandes, del orden de MB o GB. Memoria virtual con *swap*, paginado, etc.
- Énfasis en uso de Sistemas Operativos

Microcontrolador

- Bajo costo
- Bajos recursos
- I/O desarrollada
- Múltiple puertos
- Soporte en hardware para protocolos I/O
- Memorias pequeñas, del orden de kB a MB





Plataformas de cómputo 2/2

Microprocesador

- Sistema Operativo de propósito general:
 - Comunicaciones
 - Herramientas
 - Lenguajes
- Multitarea, tiempo real blando
- Varios modelos de concurrencia: memoria compartida, pipes, etc.

Microcontrolador

- Sistema dedicado:
 - Sin Sistema Operativo, a veces se usa un RTOS
- Se programa en C/C++
- Tiempo real duro:
 - Control preciso del reloj y del flujo del programa
 - Interrupciones en eventos de hardware

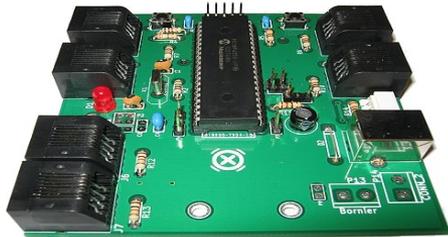




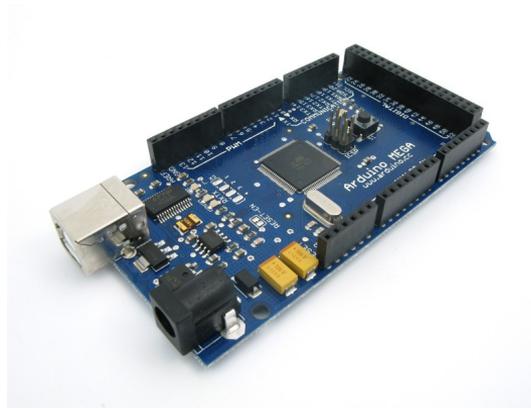
Placas microcontroladas

Una placa con un microconotrolador y periféricos necesarios:

- Alimentación
- Reloj
- Antenas
- Interfaces



USB4Butiá



Arduino



ESP32





UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Microcontroladores

Características

- Fáciles de utilizar.
- Bajo costo.
- Flexibles.
- Debido a su tamaño puede incluirse dentro del dispositivo que gobierna.





Alimentación

- Minimizar el consumo de corriente es un tema a tener en cuenta.
- Hay que tener en cuenta el consumo:
 - Del microcontrolador en modo normal.
 - Depende de la frecuencia y del voltaje proporcionado.
 - Del microcontrolador en modo *sleep*.
 - Del los dispositivos conectados a la E/S.
 - Particular de cada aplicación.
 - Pueden gestionarse adecuadamente los dispositivos.
 - De las comunicaciones.





Funcionalidades adicionales

Un microcontrolador puede contar con hardware adicional para optimizar tareas comunes.

- **Timers:** se utiliza para trabajar con eventos de tiempo.
- **Contadores:** cuentan acontecimientos que suceden en el exterior.
- **Temporizadores:** controlan períodos de tiempo.





UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Desarrollo de software

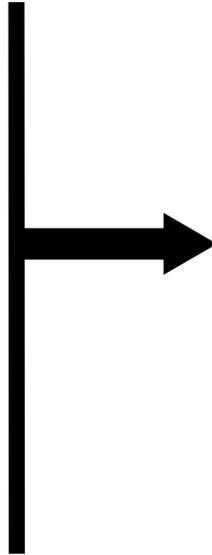
- Herramientas y entornos de desarrollo
- Programación
- Debug





Herramientas y entornos de desarrollo 1/3

- Editor
- Compilador
- Ensamblador
- Simulador
- Emulador
- Programador
- SDK de la plataforma



IDE





Herramientas y entornos de desarrollo 2/3

- Ensamblador
- Lenguaje de alto nivel
 - C, C++, Basic, Forth, MicroPython, Lua.
 - Pueden proporcionar
 - Mayor nivel de abstracción
 - Bibliotecas.
 - Tipos de datos.
 - Variables locales y globales.
 - Estructuras de datos y punteros.
 - Asignación de memoria para datos.
 - Acceso a registros.
 - Reducen el tiempo de desarrollo, mejoran la calidad del código.





Herramientas y entornos de desarrollo 3/3

Software Development Kit (SDK), una biblioteca de rutinas básicas para interactuar con el sistema

- Funciones para acceder al hardware
- Puede incluir un Real Time Operating System (RTOS)
 - Multitasking
 - Scheduling
 - Gestión de interrupciones.
 - Comunicación entre procesos.
 - Stack TCP/IP
- Provisto por el fabricante o tercera parte (ejemplo, para ESP32 tenemos *esp-idf* y *arduino*)





Systems on a chip (SOC)

Se refiere a integrar todos los componentes de un computador u otro dispositivo electrónico en un chip.

- La principal diferencia con un μ C es la memoria disponible y el soporte para MMU (swap, paginación).
- En general, los SOC permiten ejecutar sistemas operativos (S.O) tradicionales.
- Pueden ser x86, pero otros son mucho más populares: ARM, MIPS, PowerPC
- Usualmente corren alguna versión de Linux





UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Single Board Computers (SBC) ^{1/2}

Single-board computers (SBCs) son computadoras completas fabricadas en una única placa de circuito. El diseño es centrado en un microprocesador con RAM, almacenamiento, E/S y otras características necesarias para ser una computadora funcional en una sola placa.





Single Board Computers (SBC) 2/2

- Actualmente existe una gran gama de SBC basadas en SOC.
- Un SOC por si solo no puede funcionar, necesita de alimentación, acondicionamientos de señales, conectores, y algún controlador adicional.
- Más pequeñas, más eficientes energéticamente y con mayores posibilidades de E/S que un sistema tradicional.





SOC/SBCvs Microcontrolador

SOC/SBC

- Permiten utilizar Sistemas Operativos de propósito general, software, device drivers y periféricos utilizados en Pcs
- Dispositivos diseñados con SOC se adaptan mejor a nuevos requerimientos que los diseñados con microcontroladores
- Acortan la curva de aprendizaje

Microcontrolador

- Menor costo y tamaño
- Menor consumo eléctrico





Plataformas



Microcontroladores

System-On-a-Chip

Single Board Computer

Desktop

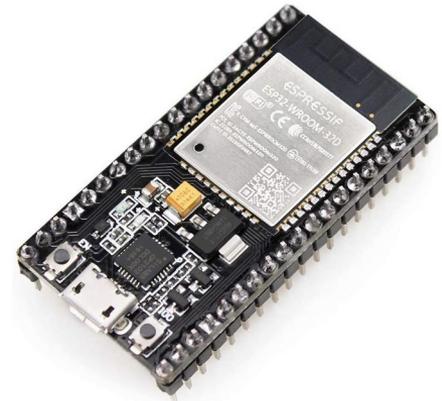
Server





Placa microcontrolada típico

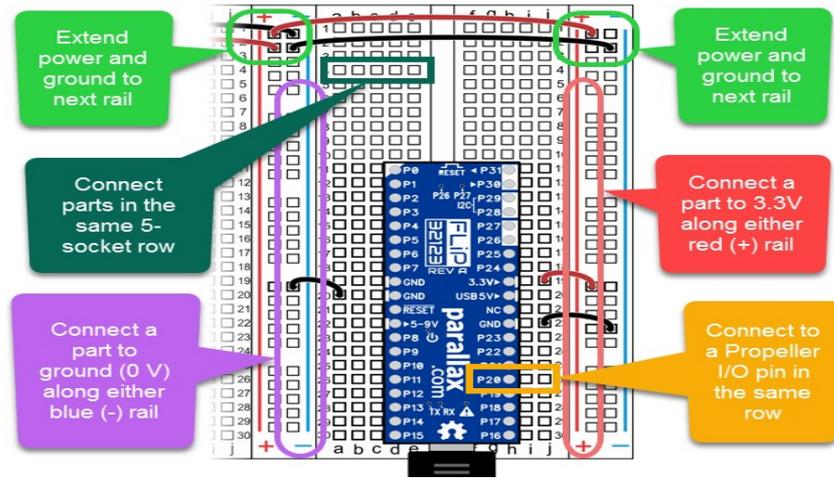
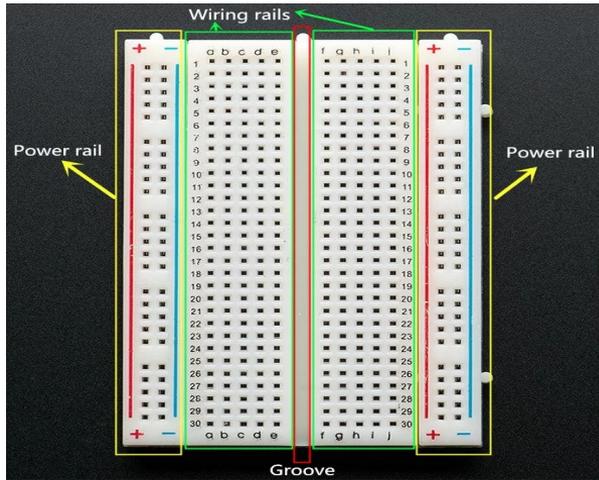
- Alimentación:
 - A través de USB (5V)
 - Regulador interno a 3.3V
 - 250 mA
- Memoria
 - RAM 32 KB
 - DRAM 80 KB
 - FLASH 200 KB
- Módulo WiFi y Bluetooth integrado
- Pines digitales y analógicos
- Buses I2C, SPI y Seriales
- Se programa ("flashea") por el USB





Protoboard

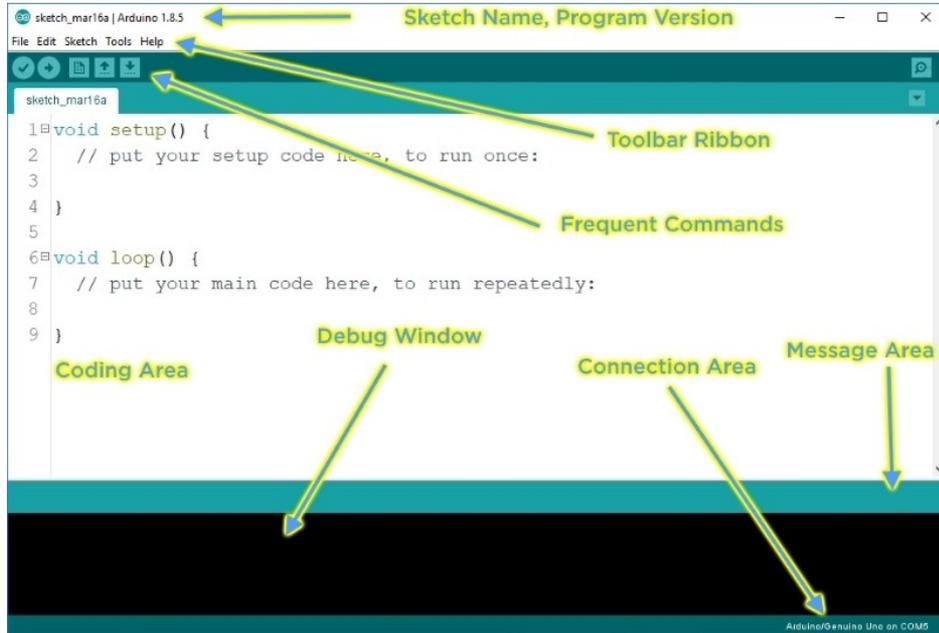
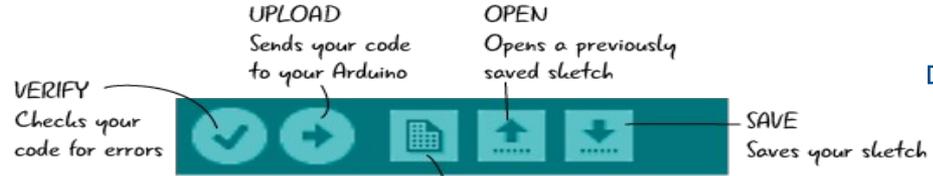
Permite realizar circuitos de forma rápida, sin necesidad de soldar.





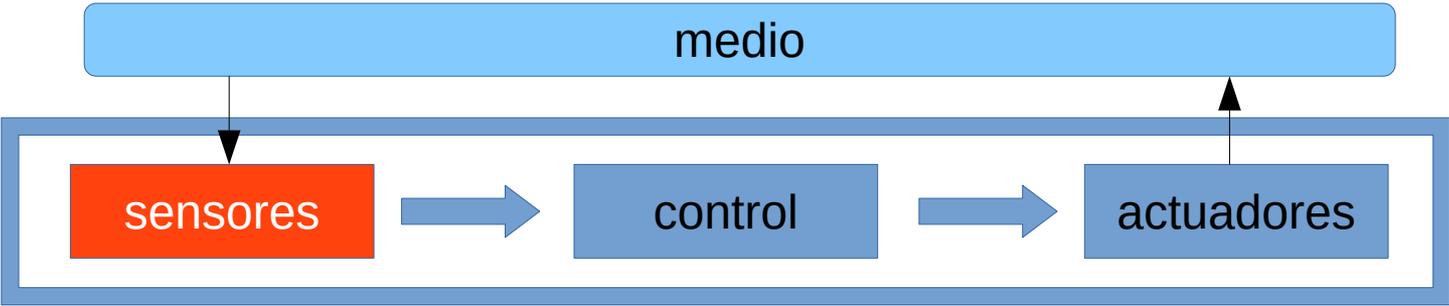
UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

IDE Arduino





Sensores

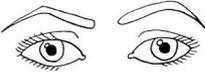




UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Sensores

Los 5 sentidos para colorear



La vista



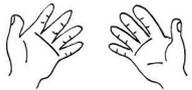
El gusto



El olfato



El oído



El tacto

 educupeques.com



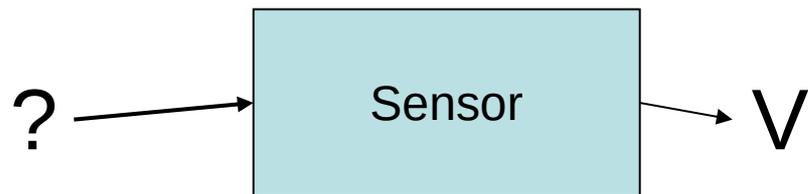


Sensores

Transductores: transforman una **magnitud física** en otra, procesable.

Clasificación:

- Introceptivos / extroceptivos
- Locales / globales
- Activos / pasivos
- Interfaz de lectura





Sensores

Introceptivos

Miden el estado interno del dispositivo

- Temperatura de un motor
- Ángulo de una articulación
- Carga de la batería

Extroceptivos

Miden características del entorno externos al dispositivo

- Humedad ambiente
- Distancia a un obstáculo
- Orientación





UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Sensores

Locales

Sensores montados en el dispositivo

- Termómetro
- Cámara
- Acelerómetro

Globales

Sensores externos que transmiten datos al dispositivo

- Estación meteorológica





Sensores

Pasivos

Toman medidas sin perturbar el entorno

- Termómetro
- Cámara de vídeo
- Acelerómetro

Activos

Perturban el ambiente para medir la reacción

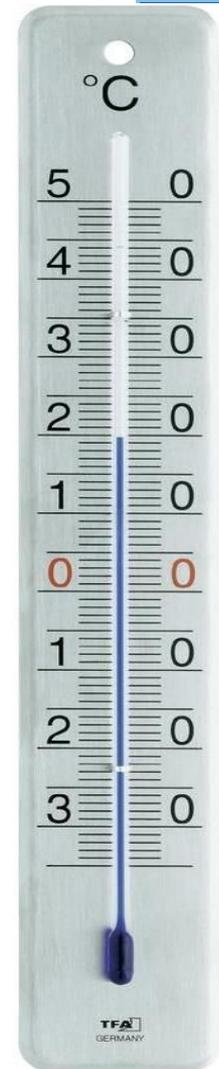
- Radar
- Sonar
- Telémetro láser



Sensores

Características:

- Magnitud medida
- Rango
- Exactitud
- Precisión (Ruido)
- Resolución (Apreciación)
- Tiempo de medida



Sensores

Características:

- Magnitud medida
- Rango: -35°C $+50^{\circ}\text{C}$
- Exactitud: $\pm 2^{\circ}\text{C}$
- Precisión (Ruido): ?
- Resolución (Apreciación): 0.5°C
- Tiempo de medida: 5min





Ruido

Diferencia entre las medidas y el valor real

- Modelo del sensado incompleto...
- Ruido térmico...
- Interferencia cruzada...
- Fallos al adquirir un valor...
- Tiene asociada una función de probabilidad

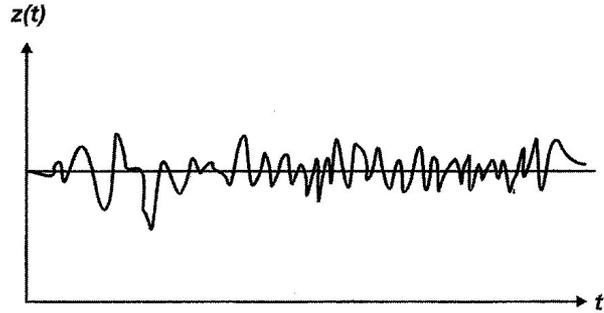
Herramientas para manejar el error:

- Filtros, promediar, por corte de frecuencia
- Filtros Kalman

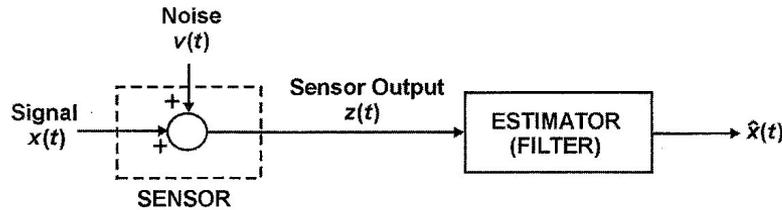




Filtros: promediar



(a)



(b)

$$\hat{x} = \frac{1}{t} \int_{t=0}^t z(t) dt$$

$$\hat{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z(t_i)$$





Filtros: promediar

Se puede promediar incrementalmente:

$$\hat{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z(t_i)$$

$$x_{N+1}^{\hat{}} = x_N^{\hat{}} + \frac{x_{N+1} - x_N^{\hat{}}}{N+1}$$

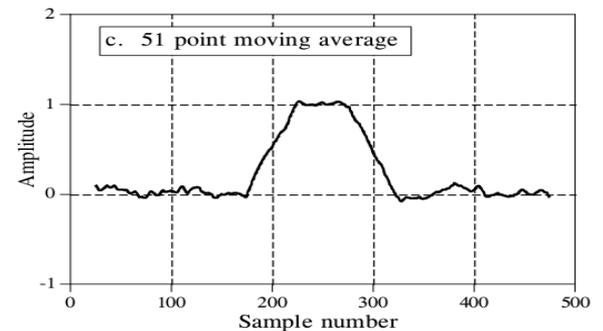
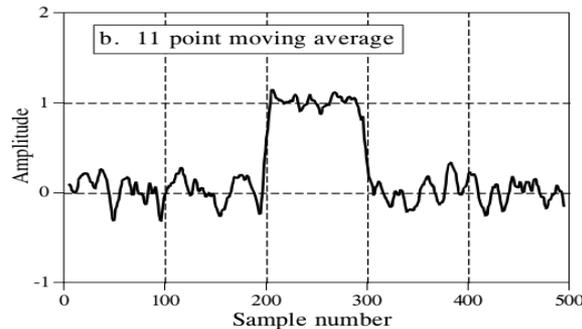
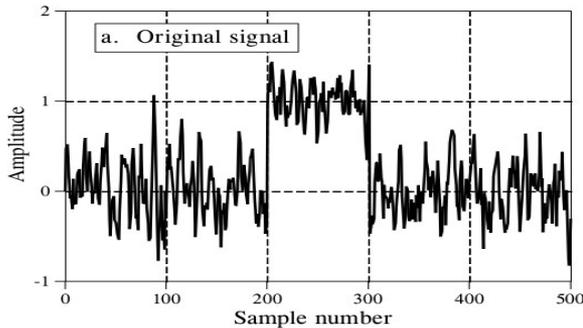




Filtros: promediar

Se puede promediar una porción de tiempo (ventana móvil)

- Número de muestras: balance entre suavidad del filtrado y velocidad de respuesta





Filtros: pasabajos

- Los distintos componentes de una señal tienen distintas frecuencias: varían a distintas velocidades
- El ruido tiende a ser de frecuencias muy altas. Ejemplo: cada sample es independiente del anterior.
- Si eliminamos las frecuencias más altas, filtramos el ruido.
- Idea: limitar la velocidad a la que varía la señal:

$$Out_i = Out_{i-1} + \alpha * (Sensor_i - Out_{i-1})$$





Interfaces con sensores

- Digitales
 - On-off: contacto, presencia o ausencia
 - Conteo de pulsos, Pulse Width Modulation (PWM)
 - Paralelos
- Analógicos
 - Distancia, temperatura, fuerzas...
 - Un voltaje en un rango, a ser digitalizado
- Protocolos de comunicación





Sensores binarios

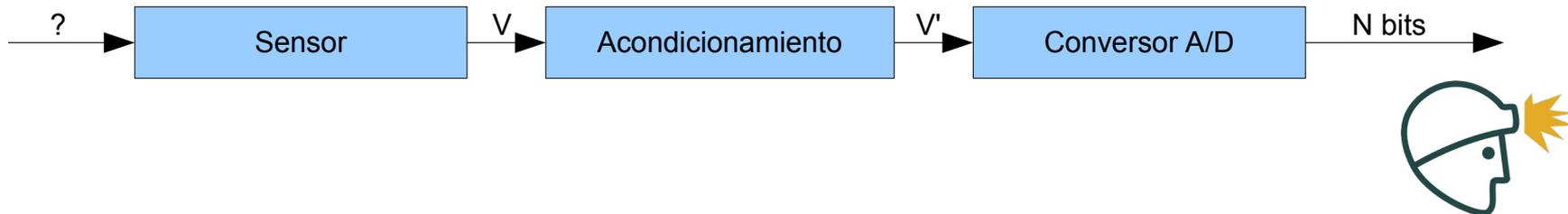
- Son el tipo más simple de los sensores.
- Sólo devuelven un solo bit de información: 0 o 1.
- ¿Está tocando? ¿Hay algo? ¿Supera un umbral?
- Interfaz con el sistema de control muy simple, por ejemplo utilizando una entrada digital





Sensores analógicos

- Accedidos mediante un convertidor A/D
 - Rango de medición (p.ej. 0..5V)
 - Precisión: número de bits destino (p.ej. 10 bits)
 - Velocidad: #conversiones por segundo (p.ej. 500)
- La señal puede tener que ser acondicionada:
 - Rango de la señal mayor al rango del ADC (saturación)
 - Se quiere sensar una función de la salida del sensor
 - Filtrar ruido o señales extrañas





Protocolos para sensores

Protocolos de comunicación

- Serial, UART (GPS, Cámaras, IMU)
 - Baudrate fijo, punto a punto, duplex
- I2C (sensores de distancia, acelerómetros, ambientales...)
 - Múltiples dispositivos en un bus, distancias cortas
- SPI (como I2C, cámaras)
 - Maestro/esclavo, mayor velocidad que I2C
- CAN bus
 - Estándar en la industria automotriz, robusto, rápido





UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Sensores introceptivos

- Posición
 - Potenciómetros, encoders
- Velocidad
 - $\frac{\partial x}{\partial t}$, tacómetros
- Aceleración
 - $\frac{\partial v}{\partial t}$, acelerómetros
- Fuerza
 - Celdas de carga

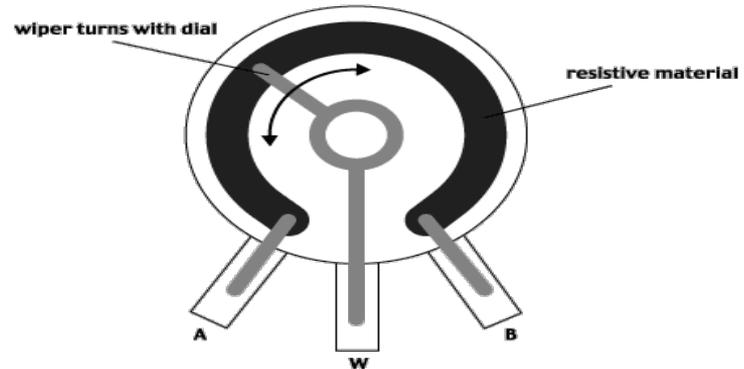




UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Sensores de posición

Potenciómetros





UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Sensores introceptivos

Otros sensores:

- Carga de baterías
- Consumo de energía
- Temperatura
- Detección de fallos
 - Sensores específicos para modos de fallo
 - Validación cruzada de sensores





Sensores extroceptivos

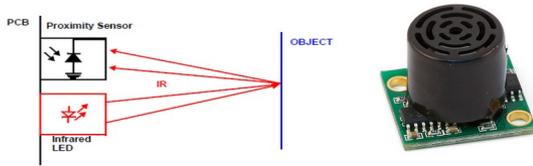
- De contacto y distancia
 - Interruptores y sensores de carga (“distancia 0”)
 - Sensores IR
 - Ultrasonido
 - Telémetro Laser
 - Luz estructurada
- Ambientales
 - Temperatura, presión atmosférica, campo magnético
- De formación de imágenes
 - En luz visible, IR, imagen térmica...
 - Cámaras, barrido óptico





Sensores de distancia

- Basados en tiempo de retorno de señal (TOF)



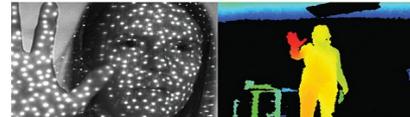
- Basados en nivel de retorno



- Interferometría laser (LIDAR)

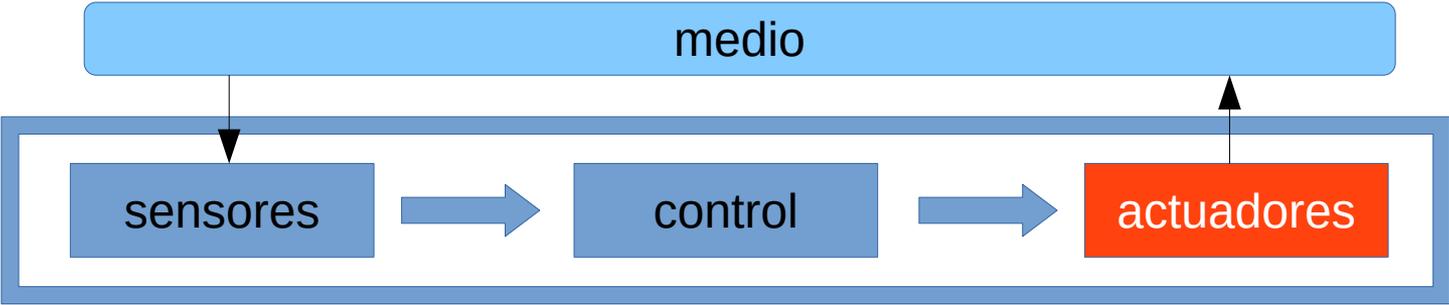


- Luz estructurada





Actuadores

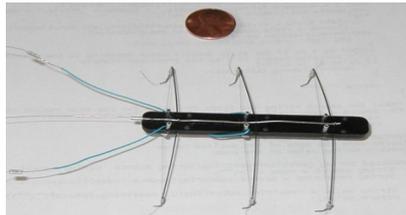
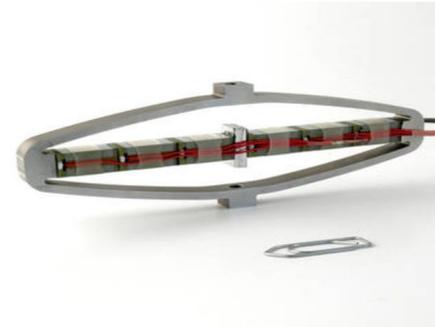




Actuadores

Actuadores mecánicos:

- Electromagnéticos
- Hidráulicos y neumáticos
- Piezoeléctricos
- Materiales con memoria
- ...





UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Actuadores





Actuadores

Actuadores mecánicos:

- Motor+cadena de salida
- Motores
 - De rotación
 - Lineales
- Salida manipulada con dispositivos mecánicos





UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Actuadores

Características:

- Dimensiones y peso
- Fuerza / torque
- Velocidad de movimientos
- Potencia consumida y eficiencia
- Parámetro controlado
 - Posición, velocidad, fuerza?
- Precisión, resolución y tiempo de respuesta
- Costo y disponibilidad





UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Motores eléctricos

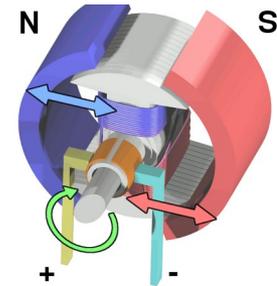
- Motores DC con escobillas
- Motores sin escobillas
- Steppers
- Servomotores





Motores DC con escobillas

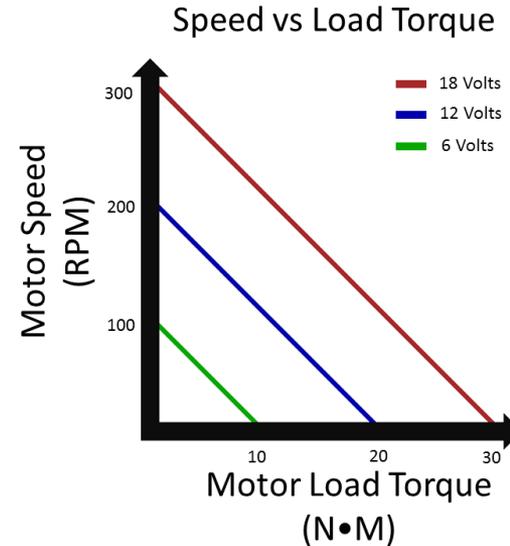
- *Brushed*
- Se le aplica un voltaje DC y gira
- Gira tan rápido como puede
- Bajo costo, simple.
- Gran variedad y disponibilidad
- No depende de ni ofrece ningún *feedback*





Motores DC con escobillas

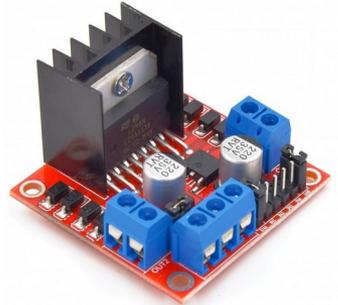
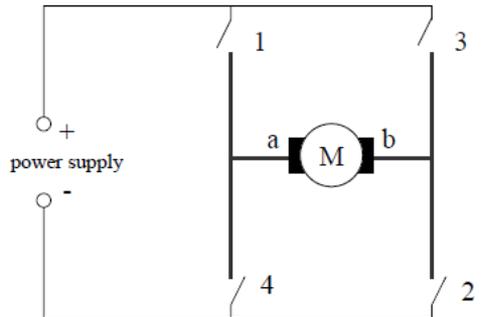
- Velocidad de giro depende del voltaje y carga mecánica (resistencia)
- Se regulan...
 - El sentido con la polaridad
 - La velocidad variando voltaje





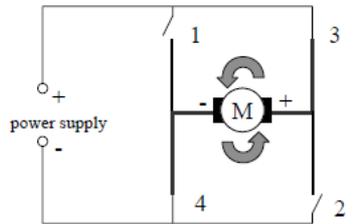
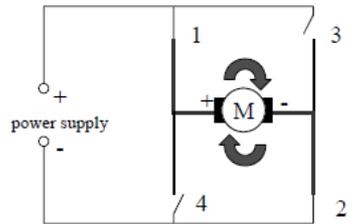
Motores DC con escobillas

Regulación del sentido de giro: Puente-H



Drive forward:

Drive backward:

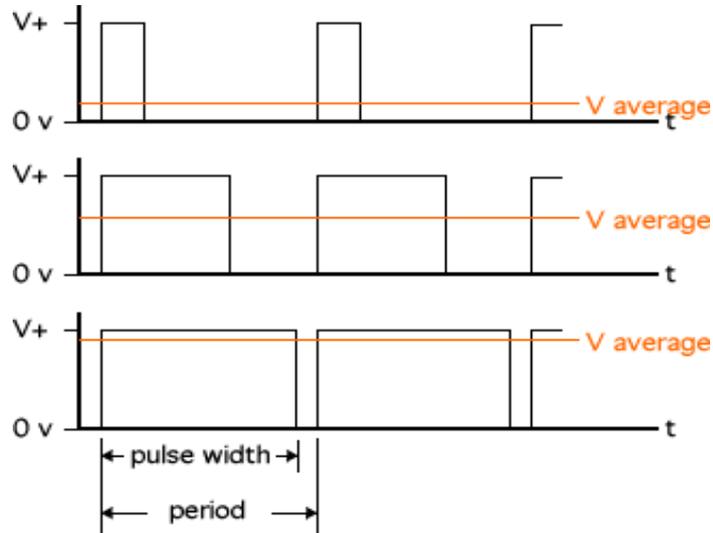




Motores DC con escobillas

Regulación de velocidad

- *Pulse Width Modulation* (PWM), pulsos de período variable.





Motores sin escobillas

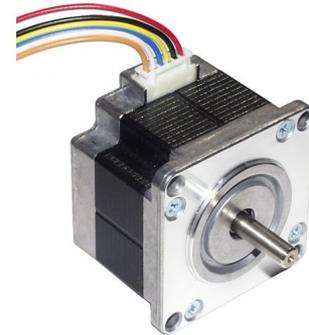
- *Brushless*, BLDC
- Un motor DC con escobillas, sin las escobillas
- La alimentación de las bobinas es realizada por un controlador externo
 - Una línea de alimentación de cada bobina
 - Líneas de sensado de la posición del eje
 - A veces puede ser omitida - sensorless
- Puede tener las bobinas fijas y los imanes en el eje.
- Motores robustos y eficientes
- Muy populares gracias a las mejoras en los sistemas de control de potencia.





Motores *stepper*

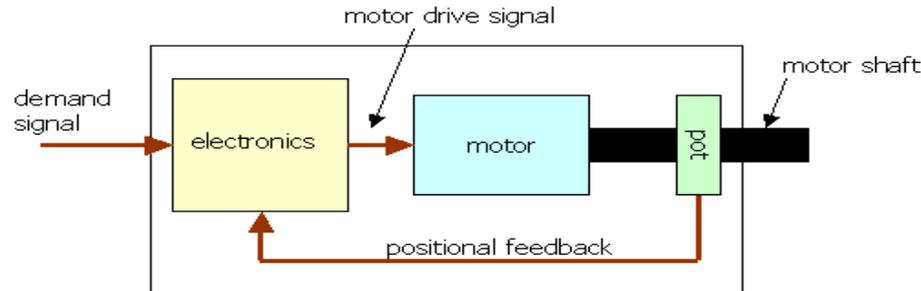
- Un *brushless* optimizado para avanzar una paso a la vez y mantener la posición
- Rotación consiste en pasos discretos
 - Varios modos posibles, según cuantas bobinas se energicen
- Resolución depende del número de bobinas
- No ofrece ni usa feedback





Servomotores

- DC brushed + encoder + sistema de control
- De posición o de rotación continua
- Control digital
 - Señalización PWM
 - Protocolo de comunicaciones





Servomotores

- RC Servos
 - De posición (en un arco limitado) o de rotación continua
 - PWM (señalización), sin feedback
- Familia Dynamixel
 - Posición, rotación
 - Protocolo serial con feedback
- Lego NXT
 - Posición, rotación
 - PWM, feedback (de posición)

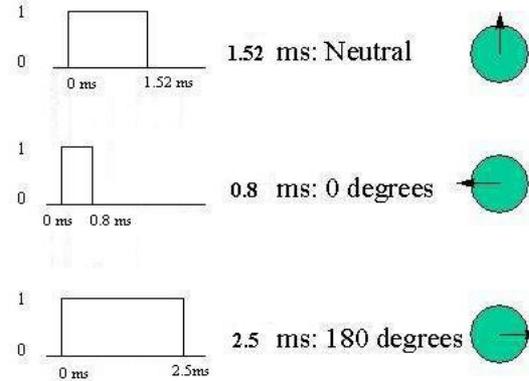




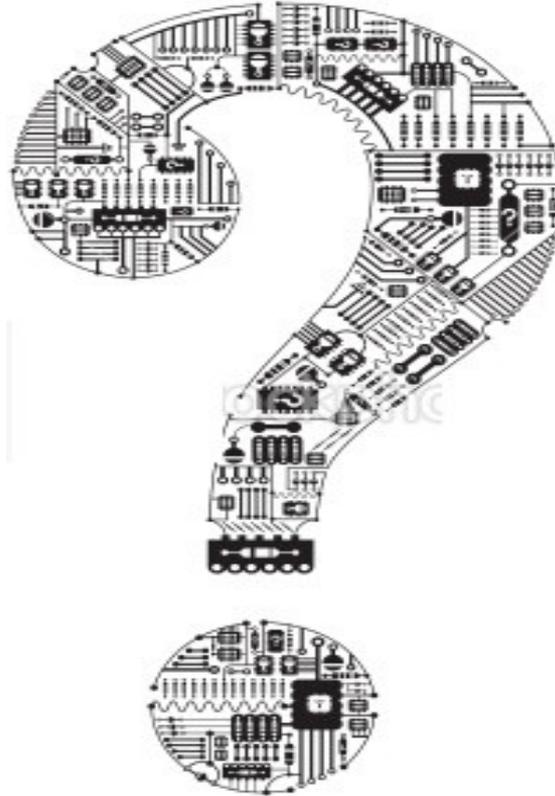
Servomotores RC

RC Servos

- Bajo costo
- Tamaños, montajes y control estandarizados
- Gran variedad de prestaciones



Preguntas



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

