



Universidad Nacional de Misiones



SISTEMAS DE CONTROL 2

Profesor: Fernando Botterón
Ingeniería Electrónica - 2020
Facultad de Ingeniería - U.Na.M

Temas de la Unidad 1

Generalidades sobre el Control Digital

- ✓ Control Digital versus Control Analógico
- ✓ Ventajas y Desventajas del Control Digital respecto al Control Analógico
- ✓ Diagrama en Bloques de un Sistema de Control Digital
- ✓ Computadoras Digitales
- ✓ Espectro de Aplicaciones del Control Digital
- ✓ Señales en los Sistemas de Control Digital
- ✓ Procesamiento de Señales en Control Digital. Tiempos Inherentes.
- ✓ Características de algunos dispositivos

Control Digital versus Control Analógico

Ventajas:

- ❖ Facilidad de Implementación (N^0 reducido de componentes)
- ❖ Flexibilidad de actualización.
- ❖ Insensibilidad a los ruidos y las variaciones paramétricas de los componentes del controlador.
- ❖ Los dispositivos digitales con los cuales se implementa el controlador, permiten crear e incluir una Interfaz Hombre-Máquina para que los usuarios puedan interactuar con el sistema. Estos dispositivos también posibilitan la implementación de sistemas de supervisión, alarmas, registro y envío de datos, comunicación con otros sistemas de control.
- ❖ Permite implementar técnicas de control sofisticadas que consideran: Variaciones paramétricas y no linealidades.
- ❖ Permite implementar técnicas de control: Clásicas, Robusto, de Tiempo Mínimo (Deadbeat), Adaptativas, Predictivas, Óptimas, Auto-análisis y Auto-sintonía, Múltiples Lazo a diferentes frecuencias de Muestreo, Control Distribuido.

Control Digital versus Control Analógico

Desventajas:

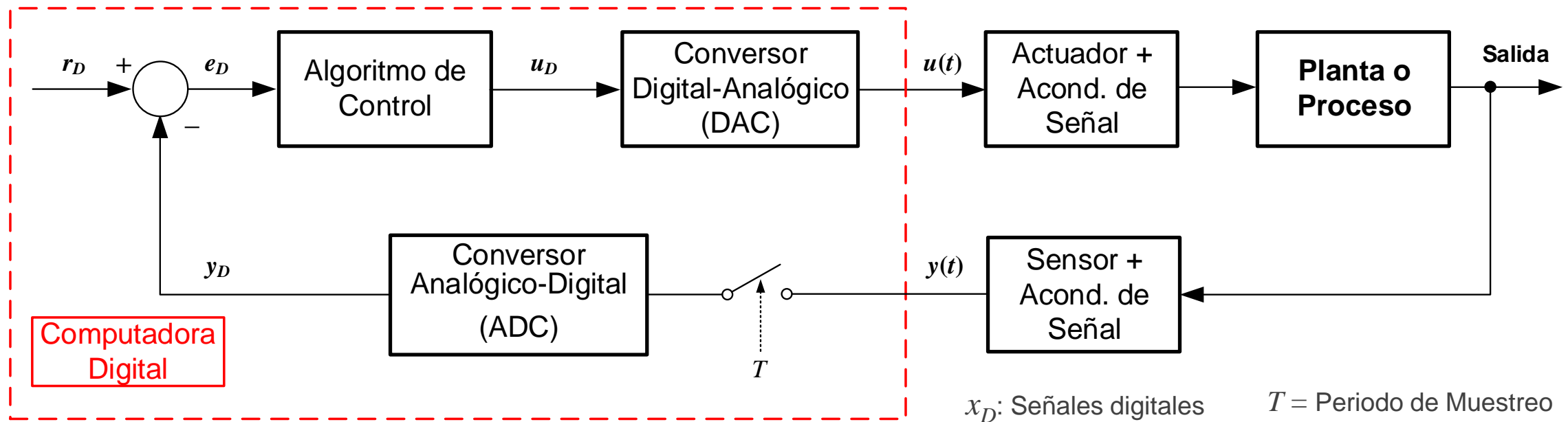
- ❖ Existen limitaciones de velocidad de cálculo y por ende, de actuación:
 - La acción de control es obtenida por el controlador a partir del procesamiento digital de señales analógicas, y esto lleva un tiempo determinado.
 - La velocidad finita de cálculo del procesador digital, provoca retrasos en la aplicación de la acción de control, lo cual puede provocar inestabilidades en la salida del sistema de control.
 - Este atraso debe ser tenido en cuenta en el modelo dinámico del proceso a controlar.
- ❖ Existen limitaciones con la resolución de las variables controladas:
 - El cálculo de la acción de control se efectúa con una exactitud que está sujeta a la longitud de palabra (N° de bits) del procesador digital con el cual se implementa el control.
 - El efecto de la resolución se traduce en una perturbación sobre la señal controlada.

Espectro de Aplicaciones del Control Digital

- ❖ Control de torque, velocidad y posición de motores de CC y CA.
- ❖ Sistemas de Asistencia al Conductor de automóviles.
- ❖ Fuentes Ininterrumpidas de Energía Eléctrica (UPS).
- ❖ Filtros Activos de Potencia.
- ❖ Industria militar y aeroespacial.
- ❖ Fuentes de Alimentación en Modo Conmutado.
- ❖ Procesos industriales de todo tipo: laminación, impresión, extrusión de plástico o de metales, laminación de rollos de madera y tablonado, procesos de secado del té y yerba mate.
- ❖ Control de robots. Vehículos Eléctricos. Tracción Eléctrica. Telecomunicaciones.
- ❖ Control de tensión y frecuencia, potencia activa y reactiva en usinas de generación.

Sistema de Control Digital

Diagrama de Bloques:



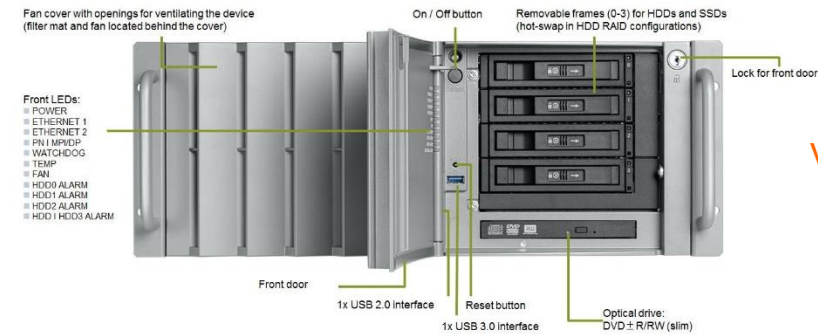
❖ La Computadora Digital calcula el error, lo procesa mediante el algoritmo de control y genera la acción de control correspondiente.

❖ La Computadora Digital puede o no incorporar a los dispositivos ADC y DAC, pudiendo ser:

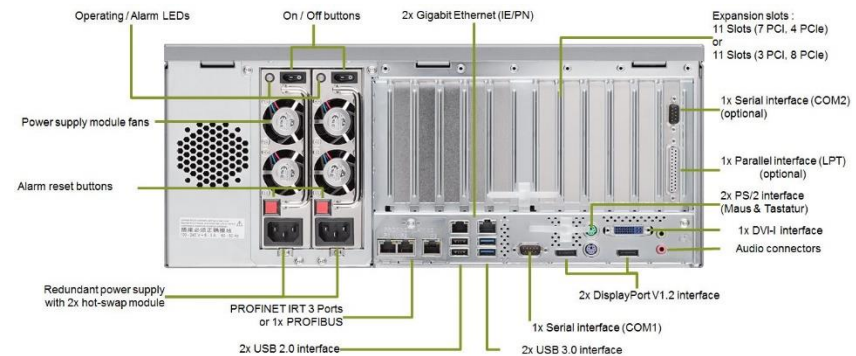
- ❑ Computadora Industrial o Personal.
- ❑ Controlador Lógico Programable (PLC).
- ❑ Microprocesador (uP).
- ❑ Microcontrolador (uC).
- ❑ Procesador Digital de Señales (DSP).
- ❑ Controlador Digital de Señales (DSC).
- ❑ PSoC o FPGA.

Computadora Digital

Computadoras Industriales



Vista frente abierto



Vista posterior

Diferencias c/resp. a las PCs:

- ❑ Gabinete con forma adecuada para diversos tipos de montaje (rack, pared, panel, etc.) y con acceso restringido a controles y a unidades de E/S.
- ❑ Refrigeración con filtrado de aire.
- ❑ Rango de temperatura de funcionamiento extendido (-40 a 75 °C).
- ❑ Filtrado de Interferencias Electromagnéticas (EMI) con características mejoradas.
- ❑ Redundancia en fuente de alimentación y disco rígido (muy importante para aumentar la fiabilidad del sistema de control).

Computadora Digital

Controladores Lógicos Programables (PLC)

PLC Compacto



<http://www.eaton.com>

PLC Semi-Modular



www.exsol.com.ar

PLC Direct

Automation Direct

Koyo

PLC Modular

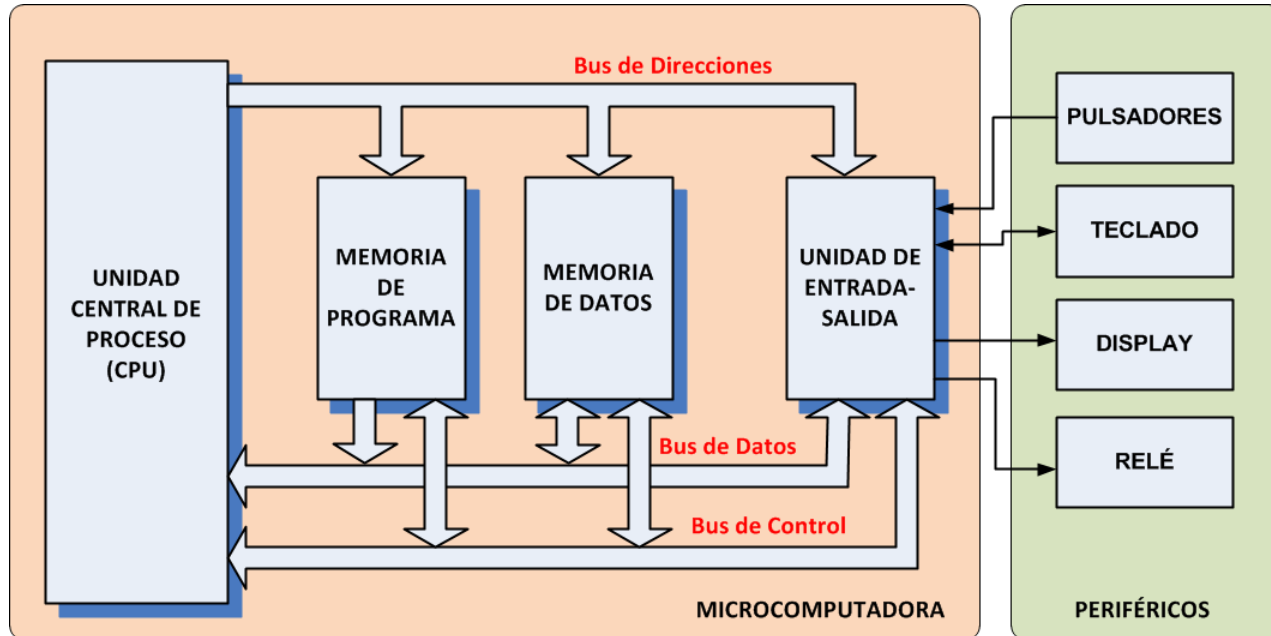


www.siemens.com

Algunas características de los PLCs:

- ❖ Se programan a través de una computadora o mediante la interfaz de usuario que posee.
- ❖ Presentan múltiple tipos de entradas y salidas e incorporan módulos de control (P, I, D, ON-OFF), contadores, temporizadores, etc.
- ❖ Algunos presentan capacidad de expansión, pudiéndose agregar módulos de comunicación, entradas, salidas, contadores, etc.

Computadora Digital: Microcontroladores y Microprocesadores



MICROPROCESADOR:

Sólo consiste en la CPU, por lo cual puede constituir una microcomputadora de ARQUITECTURA ABIERTA.

MICROCONTROLADOR:

Consiste de una CPU, memorias de programa y datos, unidad de E/S y otros módulos. Constituye una microcomputadora de ARQUITECTURA CERRADA.

CPU:

Contiene la Unidad Aritmético-Lógica (ALU) y registros especiales.

Memoria de Programa:

Almacena el programa (conjunto de instrucciones que se ejecutan de forma secuencial) y no se borra ante la falta de energía.

Memoria de Datos:

Almacena datos, tales como resultados de operaciones matemáticas. Siempre existe una memoria de datos volátil (que se borra ante la falta de energía y a veces también puede existir una no volátil para "guardar" datos en forma permanente).

Unidad de E/S:

Son registros de almacenamiento bidireccionales, que pueden configurarse bit a bit como entrada o salida. A través de estos la microcomputadora intercambia información con los periféricos.

CPU

Arquitecturas que manejan datos de:

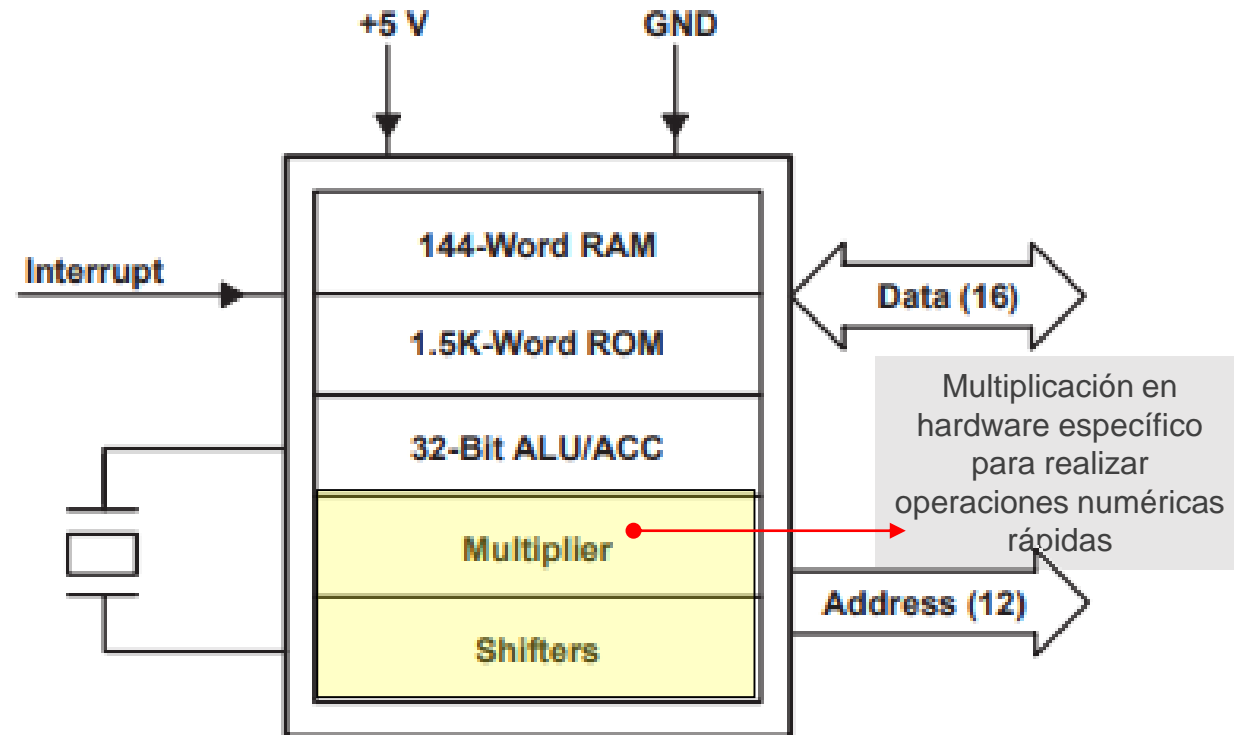
- 8 bits.
- 16 bits.
- 32 bits, con aritmética de punto fijo o de punto flotante.

A mayor número de bits, mejor exactitud en cálculos y mayor velocidad de procesamiento.

Computadora Digital: Procesadores Digitales de Señales

Procesadores Digitales de Señales (DSP) y Controladores Digitales de Señales (DSC)

DSP: Procesador con una CPU que posee hardware e instrucciones específicas, optimizadas para aplicaciones que requieran operaciones numéricas a muy alta velocidad. Tiene un coprocesador matemático dedicado para procesamiento digital de señales. Esto lo diferencia de la CPU de cualquier microcontrolador o microprocesador.



DSP de 32 bits TMS320C10

www.ti.com

Computadora Digital: Controladores Digitales de Señales

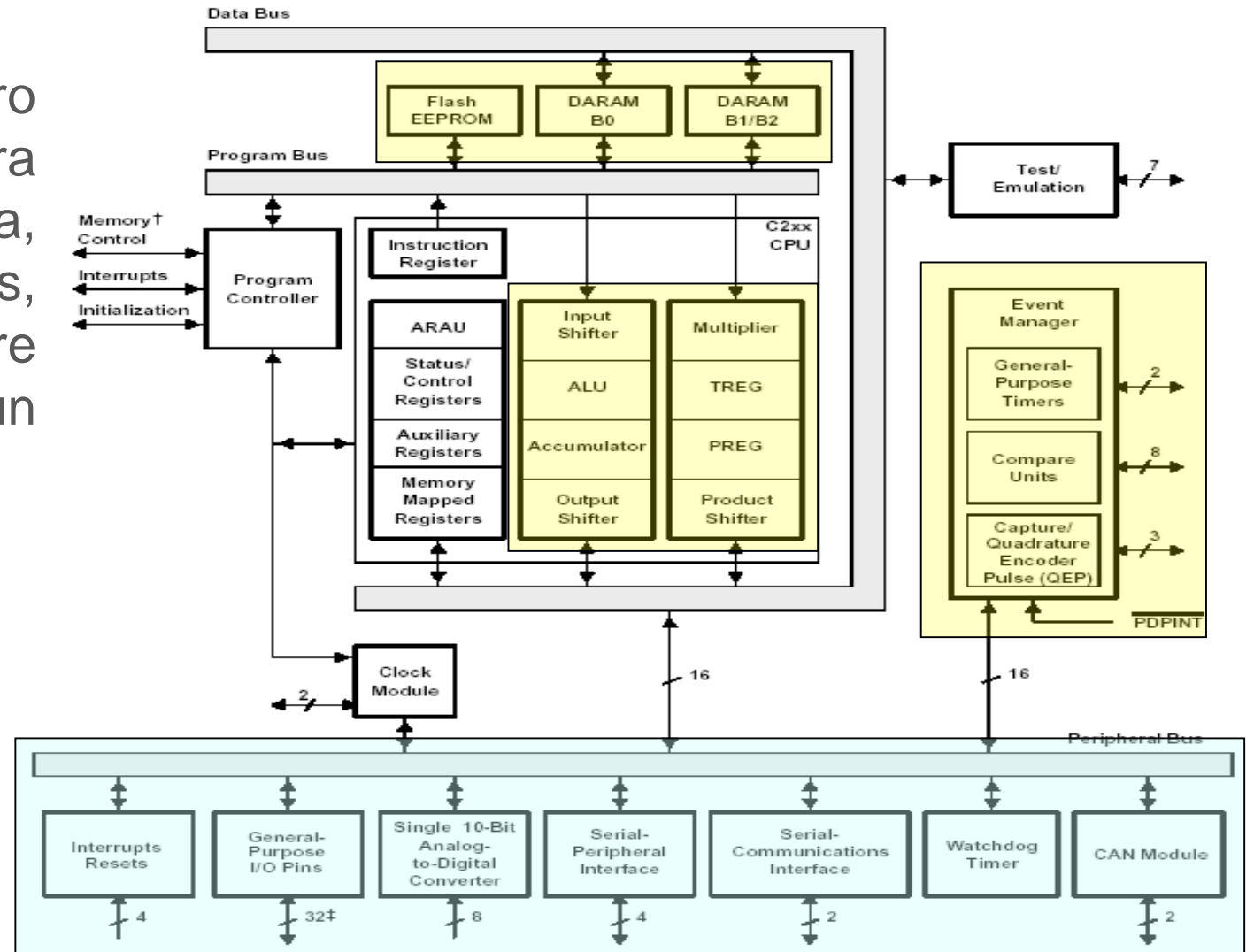
Procesadores Digitales de Señales (DSP) y Controladores Digitales de Señales (DSC)

DSC: Estructura base de un DSP, pero además, su arquitectura incorpora módulos de entrada/salida, conversores AD, temporizadores, módulos de comunicación, PWM, entre otros. Combinan las prestaciones de un DSP y un uC.

uC's y DSC's: Dispositivos diseñados específicamente para tareas de CONTROL y COMANDO.

DSC de 16 bits TMS320F241

www.ti.com



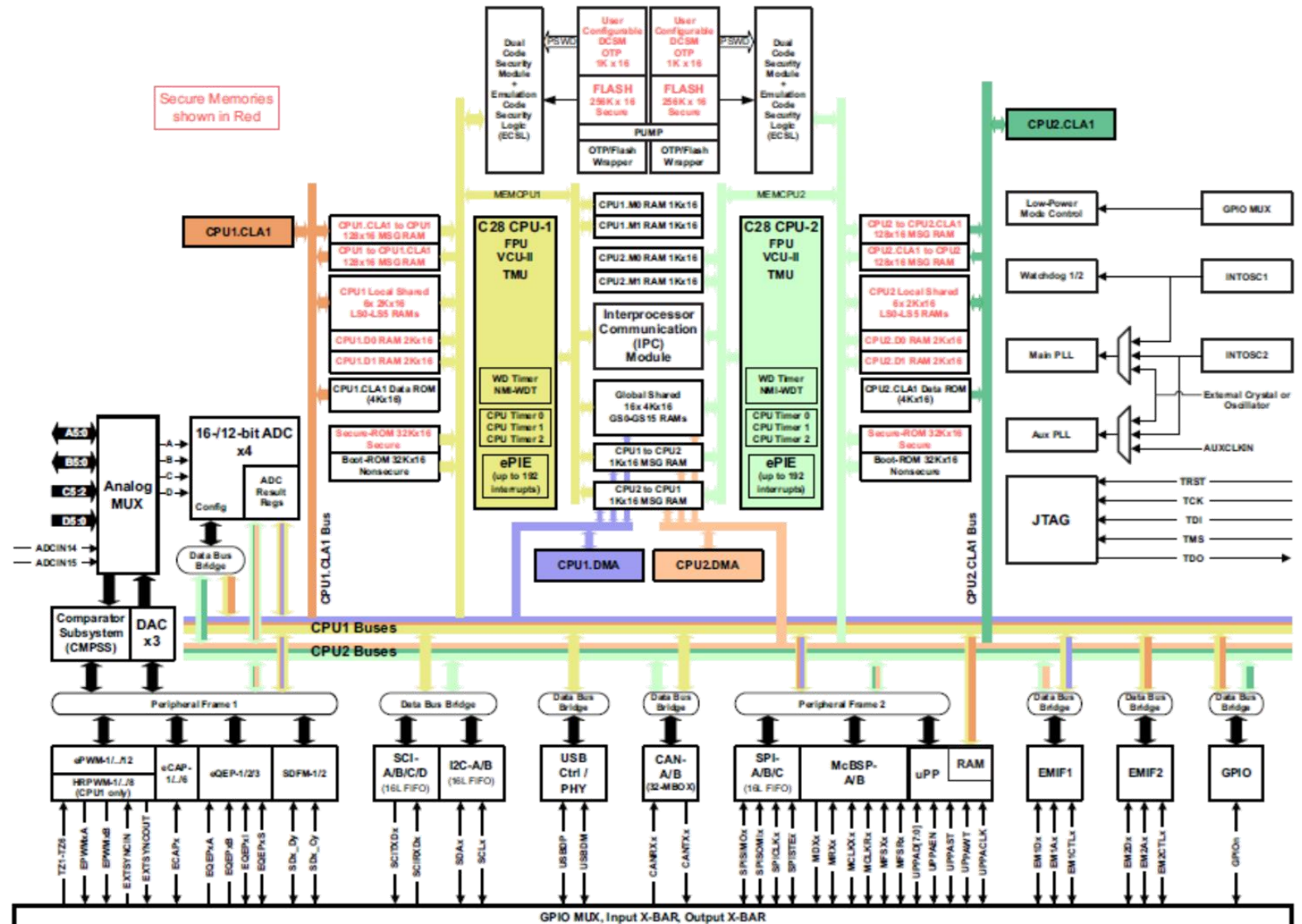
Computadora Digital: Controladores Digitales de Señales

DSCs de última generación:

Dual Core C28x, 800 MIPS,
Unidad de Punto Flotante,
1 MB de Memoria Flash,
ADC de 16 bits y de 12 bits,
PWM de alta resolución.

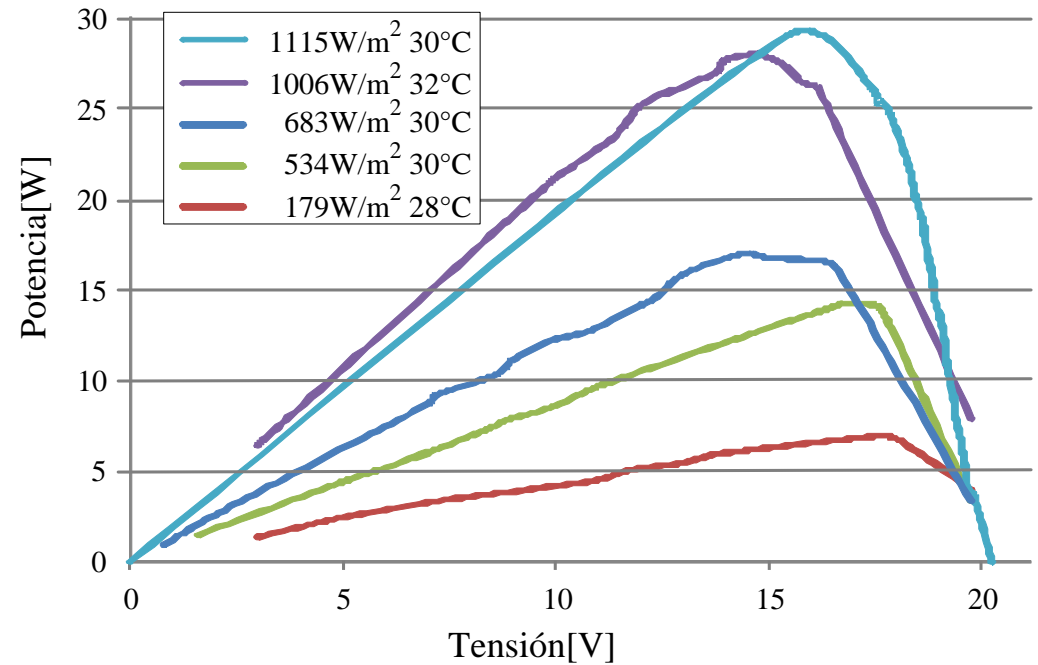
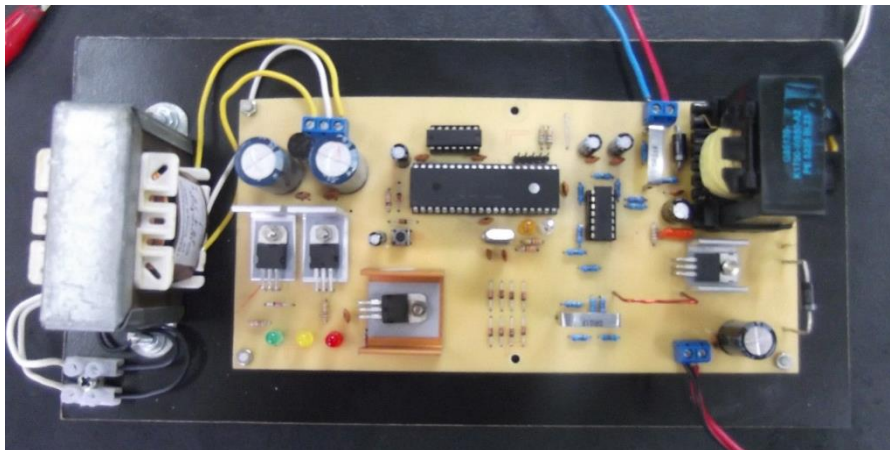
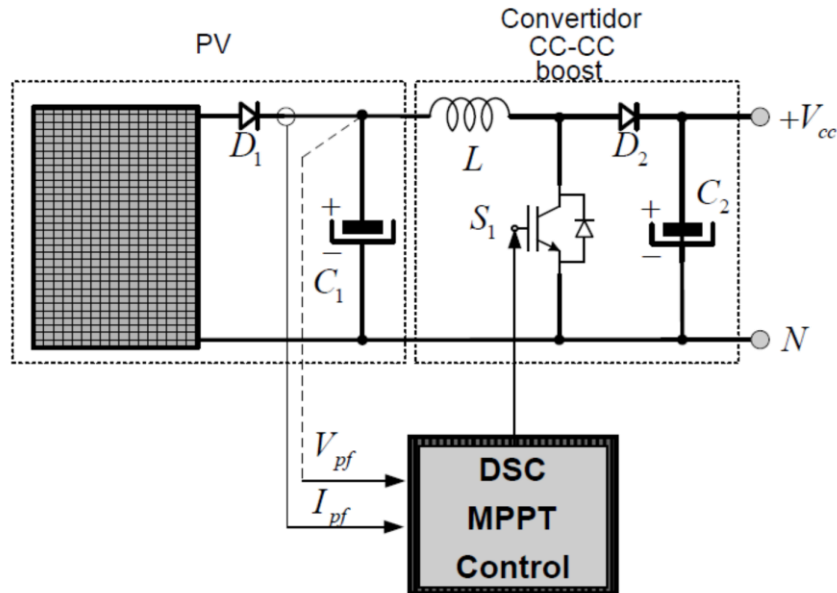
DSC de 32 bits TMS320F28379D

www.ti.com

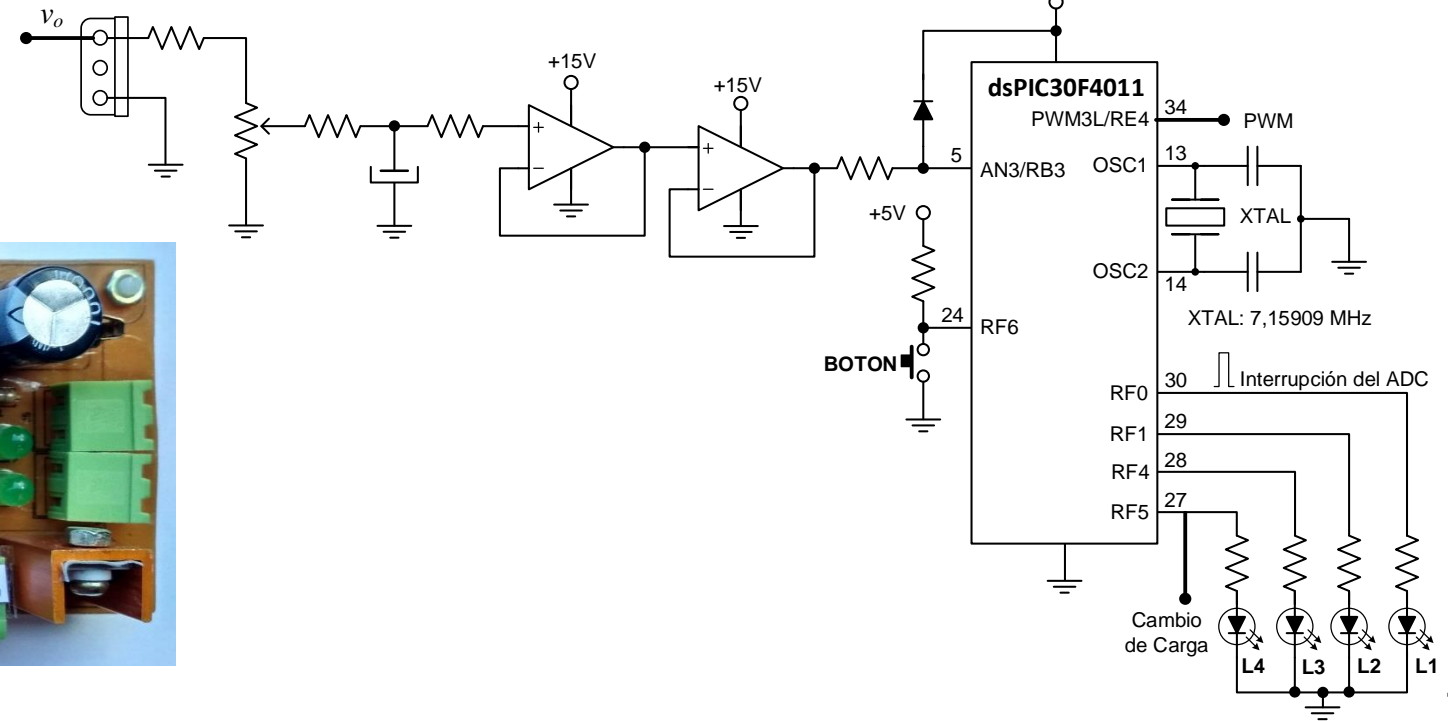
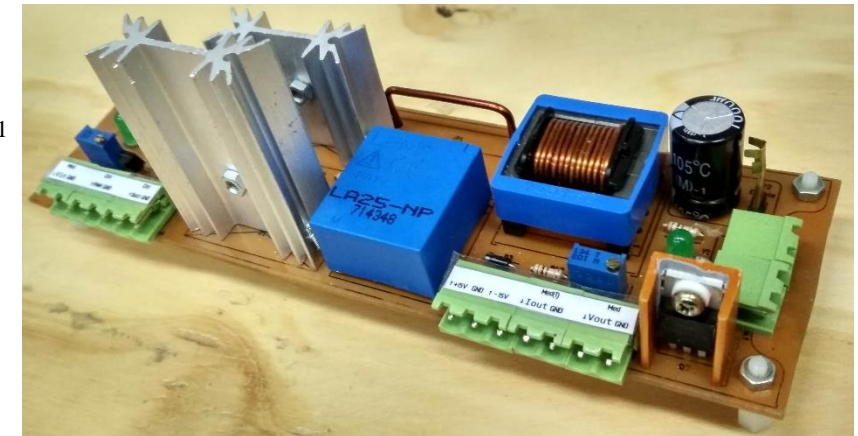
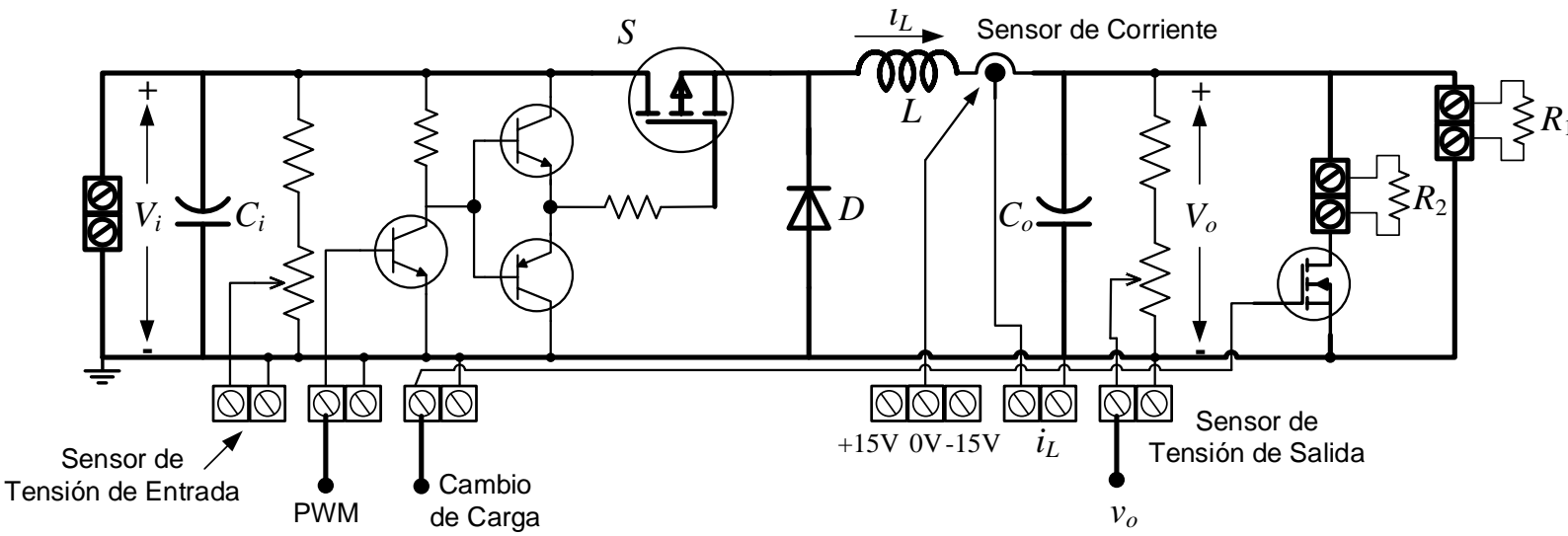


DSC dsPIC30F4011 (Microchip) - Aplicaciones

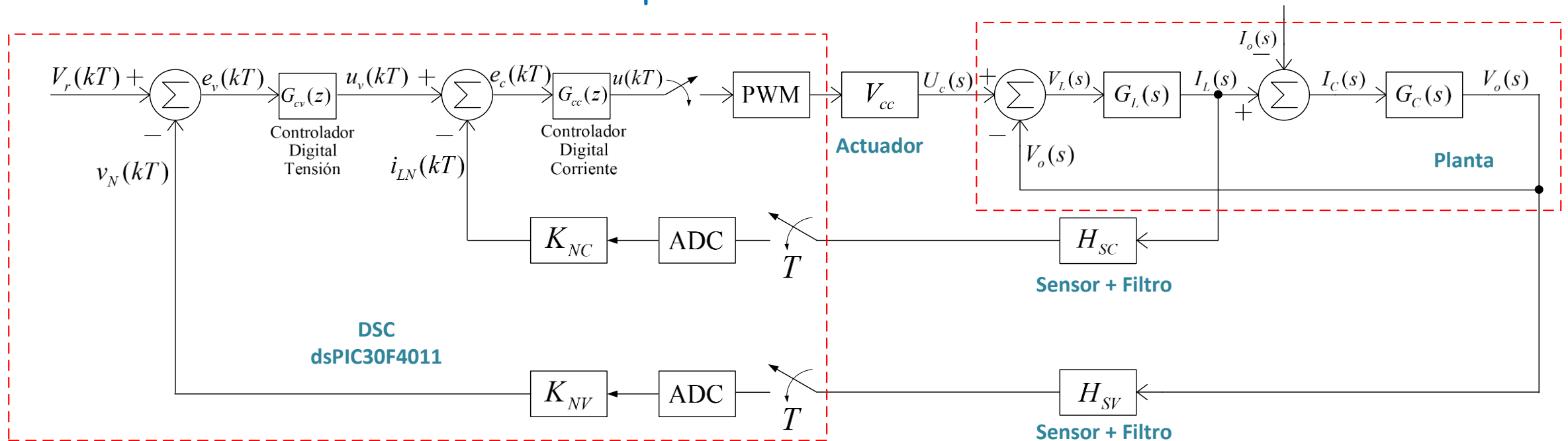
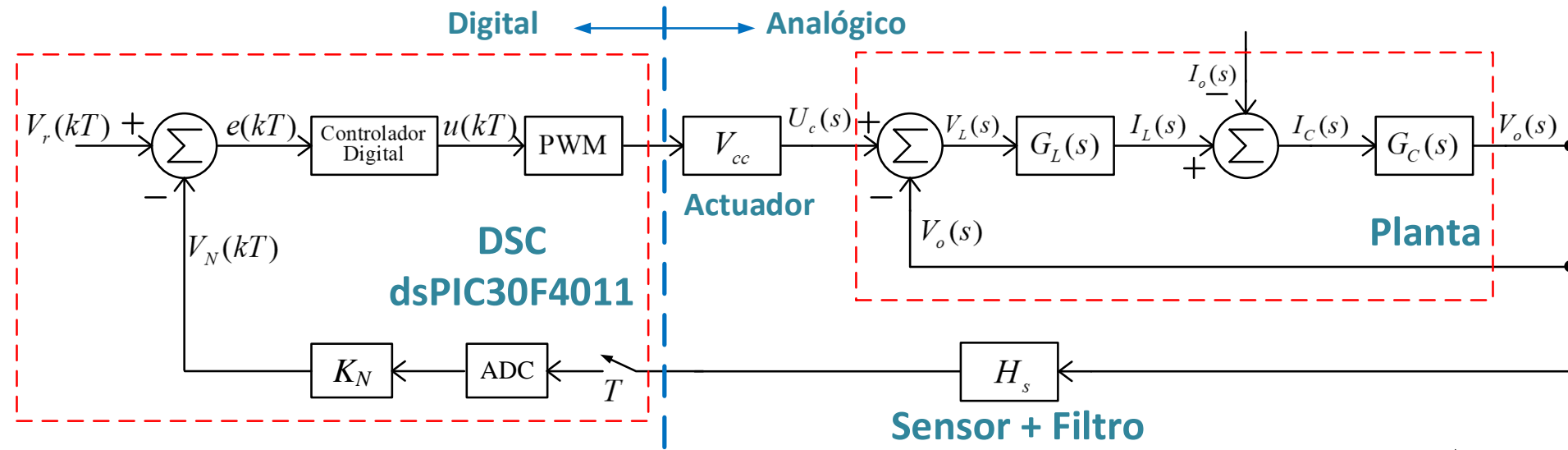
DSC Aplicación: Control MPPT de un convertidor Boost para paneles fotovoltaicos. **Autores:** Yonatan Aguirre y Julio Marteniuk



DSC dsPIC30F4011 (Microchip) – Aplicaciones: Control Convertidor Buck

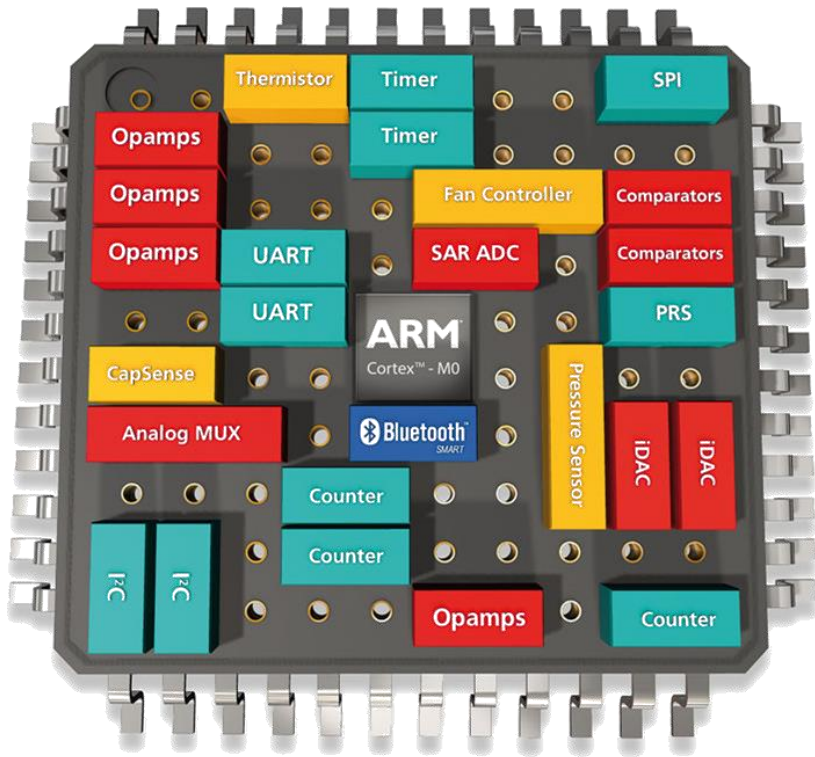


DSC dsPIC30F4011 (Microchip) – Aplicaciones: Control Convertidor Buck

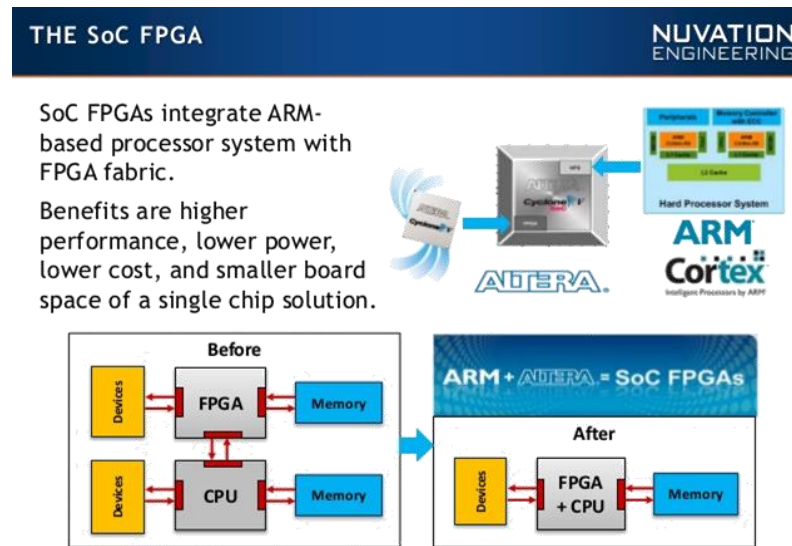


Computadora Digital: PSOC – Mixed Analog and Digital

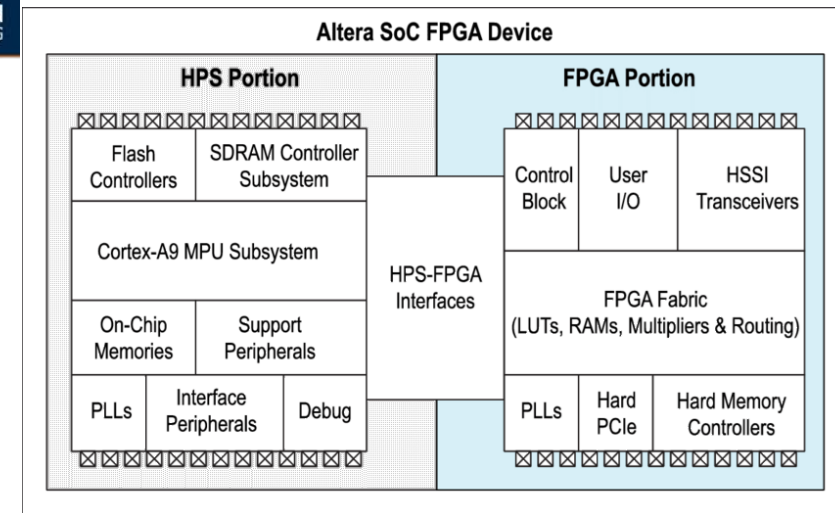
Programable System On-Chip (PSoC) y System On-Chip (SoC)



Estructura PSoC www.cypress.com



Estructura SoC-FPGA de 32 bits www.altera.com (INTEL)

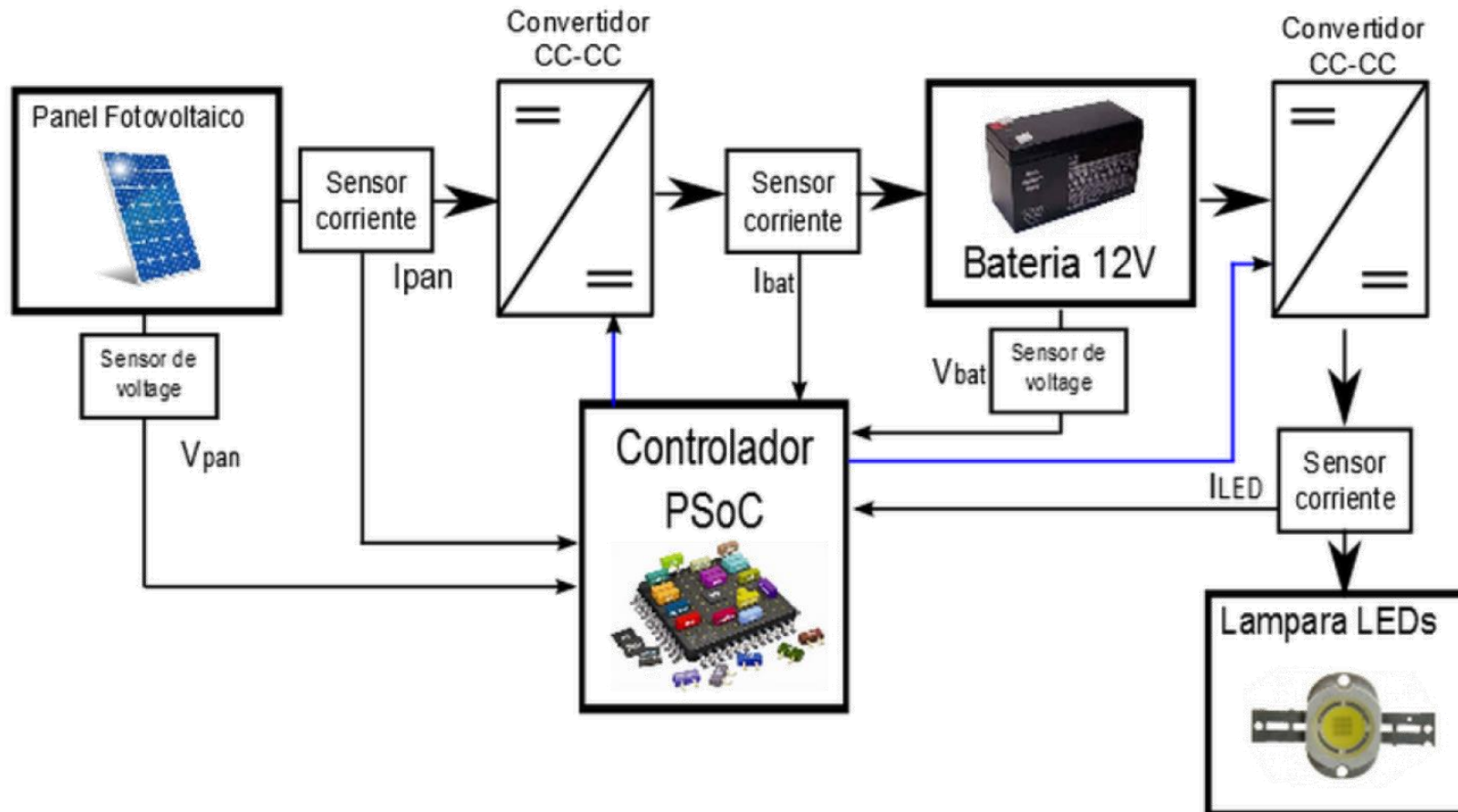


PSoC: Son microcontroladores que incluyen una matriz configurable de funciones analógicas y otra de funciones digitales.

SoC: Son dispositivos que integran en un solo chip un microprocesador y una FPGA, pudiendo operar individualmente o en forma conjunta cada uno de estos.

Computadora Digital: PSOC - Aplicación

Programable System On-Chip (PSoC): APLICACIÓN



Trabajo de Proyecto y Diseño Electrónico:

Control de carga de batería y comando de LED de alta luminosidad.

Autores: Omar Bauernfeind y Diego Zarratea

Consideraciones para la Selección de una computadora digital

❖ DESEMPEÑO DINÁMICO:

- ❑ Velocidad de procesamiento de la CPU – Millones de instrucciones por segundo (MIPS).
- ❑ Velocidad de conversión del ADC – Miles o Millones de muestras p/segundo (KSPS o MSPS).
- ❑ Cantidad de canales y resolución del ADC.
- ❑ Tamaño de palabra que maneja la ALU de la CPU. Si maneja aritmética de punto fijo o de punto flotante.
- ❑ Conjunto de instrucciones, cantidad y tipo de interrupciones.

❖ RECURSOS DE HARDWARE:

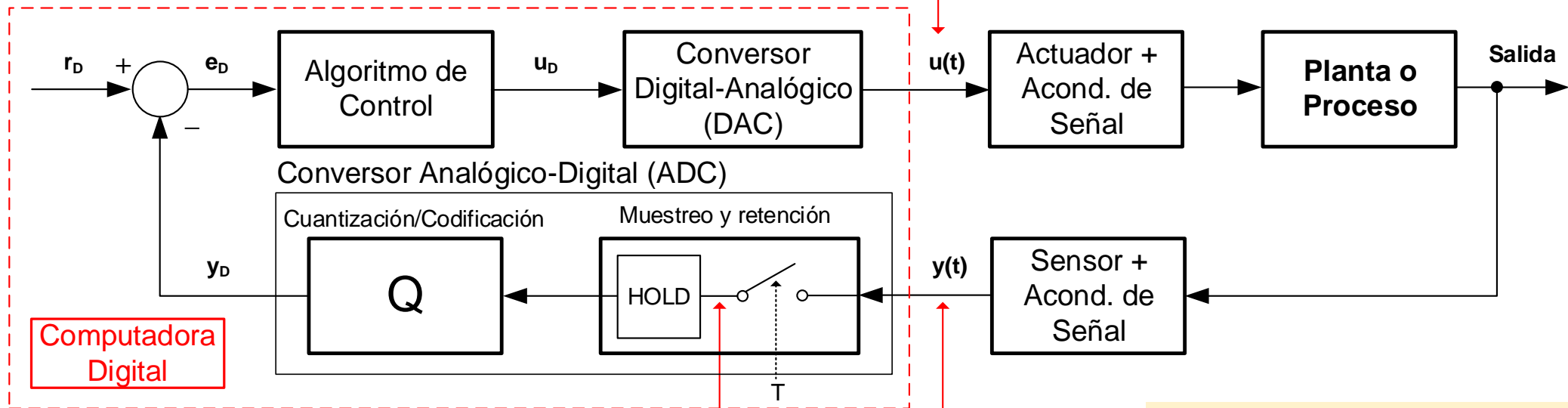
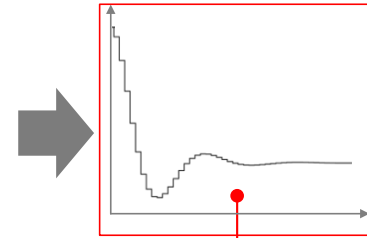
- ❑ Tamaño de las memorias de datos y de programa.
- ❑ Disponibilidad de memoria de datos no volátil (FLASH O EEPROM).
- ❑ Disponibilidad de módulos: Temporizadores, PWM, Captura, Comunicación, Puertos de I/O; entre otros.

❖ COSTO Y HERRAMIENTAS DE DESARROLLO:

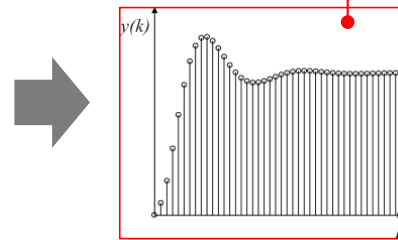
- ❑ Hoy día el costo depende de la dimensión del proyecto.
- ❑ Disponibilidad de herramientas de desarrollo: programadores, debuggers y software para desarrollo.
- ❑ Disponibilidad y costo de placas de evaluación.
- ❑ Dispositivos OTP para la industria.

Señales en los Sistemas de Control Digital

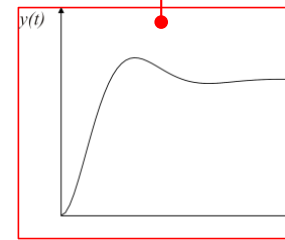
Señal Cuantificada en Tiempo Continuo: Su amplitud asume un N° finito de diferentes valores en un intervalo de tiempo continuo. Está cuantificada en amplitud y en tiempo.



Señal de Tiempo Discreto o de Datos Muestreados: Es una señal definida solo a instantes discretos de tiempo.



Señal Analógica en Tiempo Continuo: Está definida en un intervalo continuo de tiempo, cuya amplitud puede adoptar infinitos valores en este intervalo.



La Señal Digital (y_D): Es una señal de tiempo discreto cuantificada en amplitud y en tiempo. Está representada por una secuencia de números binarios con un tamaño de palabra de N bits.

Procesamiento de Señales en Control Digital

Muestreo: Es el proceso a través del cual se toman muestras de la señal analógica a intervalos regulares (periódicamente). En sistemas de control digital, las muestras pueden hacerse a diferentes frecuencias (periodos) de muestreo, pero siempre a intervalos fijos.

La frecuencia de muestreo debe ser adecuadamente seleccionada. ¿Con qué objetivo?

$$f_s = (1/T) > 2 f_{max}$$

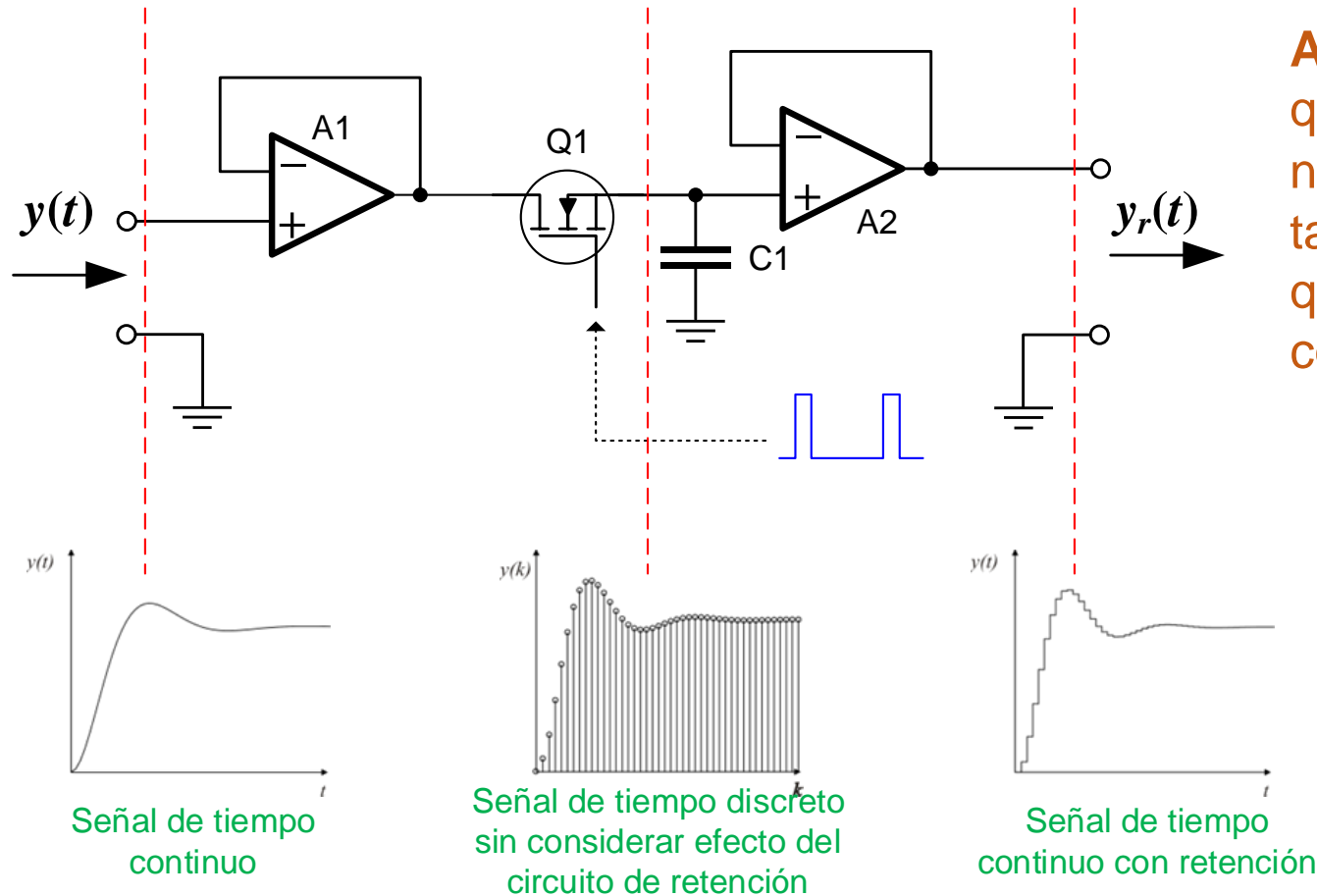
Retención: Debido a que la conversión A/D se efectúa en un tiempo finito, cada muestra de la señal analógica es retenida por el tiempo que demora en efectuarse esta conversión. Este tiempo de conversión, depende de la tecnología electrónica utilizada para tal tarea y de las precisiones que se deseen conseguir en el valor convertido.

Conversión A/D: Proceso en el que se efectúa la correspondencia entre los valores de la señal analógica muestreada y los estados digitales posibles según el N° de bits del ADC.

Los valores que toma cada muestra pueden ser infinitos en el rango de conversión, pero los valores correspondientes de salida del ADC son finitos debido a la cuantificación en amplitud.

Procesamiento de Señales en Control Digital

Muestreo y Retención



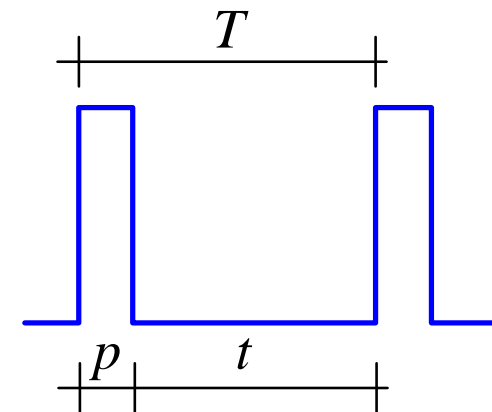
Q1: Muestreador, transistor que opera como llave.

C1: Retenedor, capacitor de almacenamiento.

A1 y A2: Amplificadores aisladores. **A1** permite que circuito presente alta impedancia de entrada y no produzca efecto de carga sobre $y(t)$. **A2** también permite alta impedancia de manera tal que el ADC no descargue a C1 durante la conversión.

Señal de Comando:

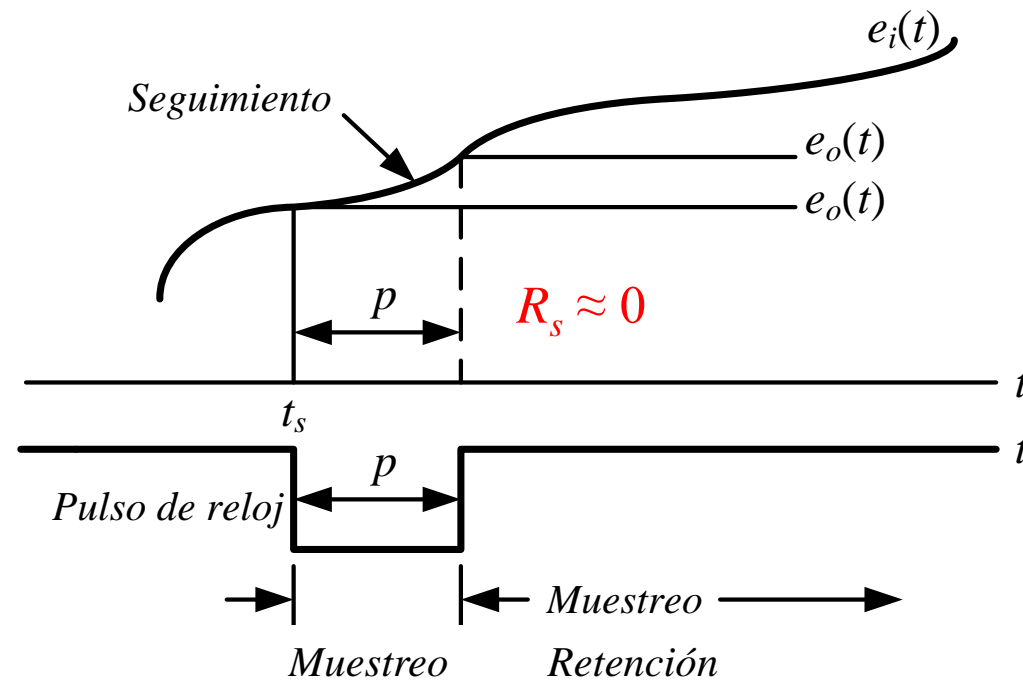
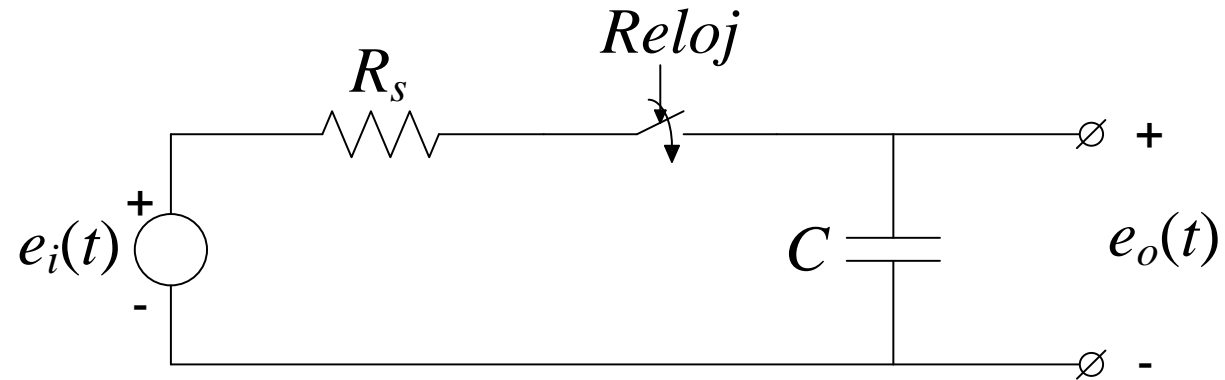
- p : Adquisición; muestreador cerrado para que C1 copie el valor de $y(t)$.
- t : Retención; muestreador abierto para que C1 retenga el valor de $y(t)$ y se realice la conversión A/D.
- T : Periodo de muestreo.



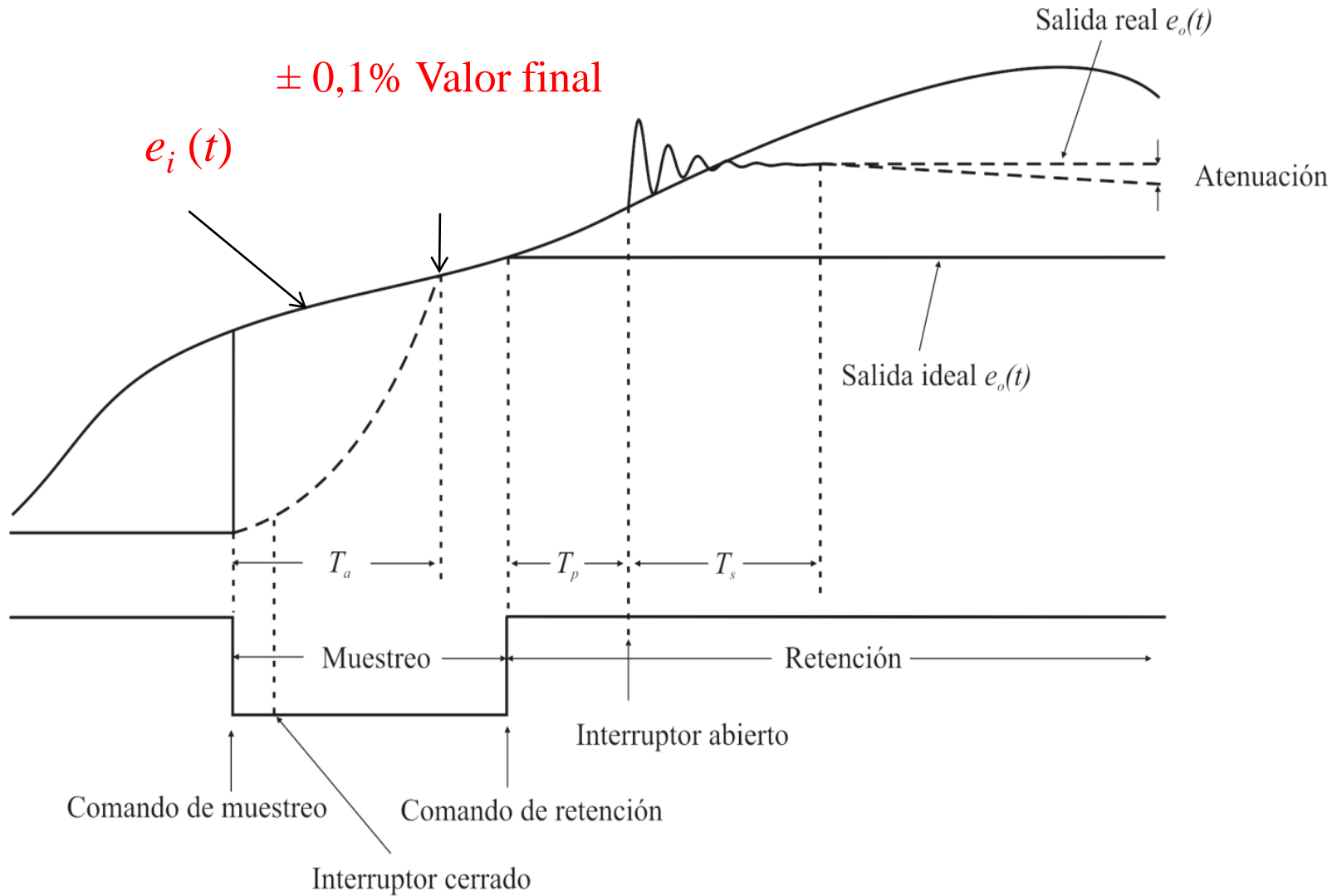
Muestreador Ideal

➔ $T \gg p$

Muestreo y Retención



Muestreo y Retención



T_a : Tiempo de adquisición

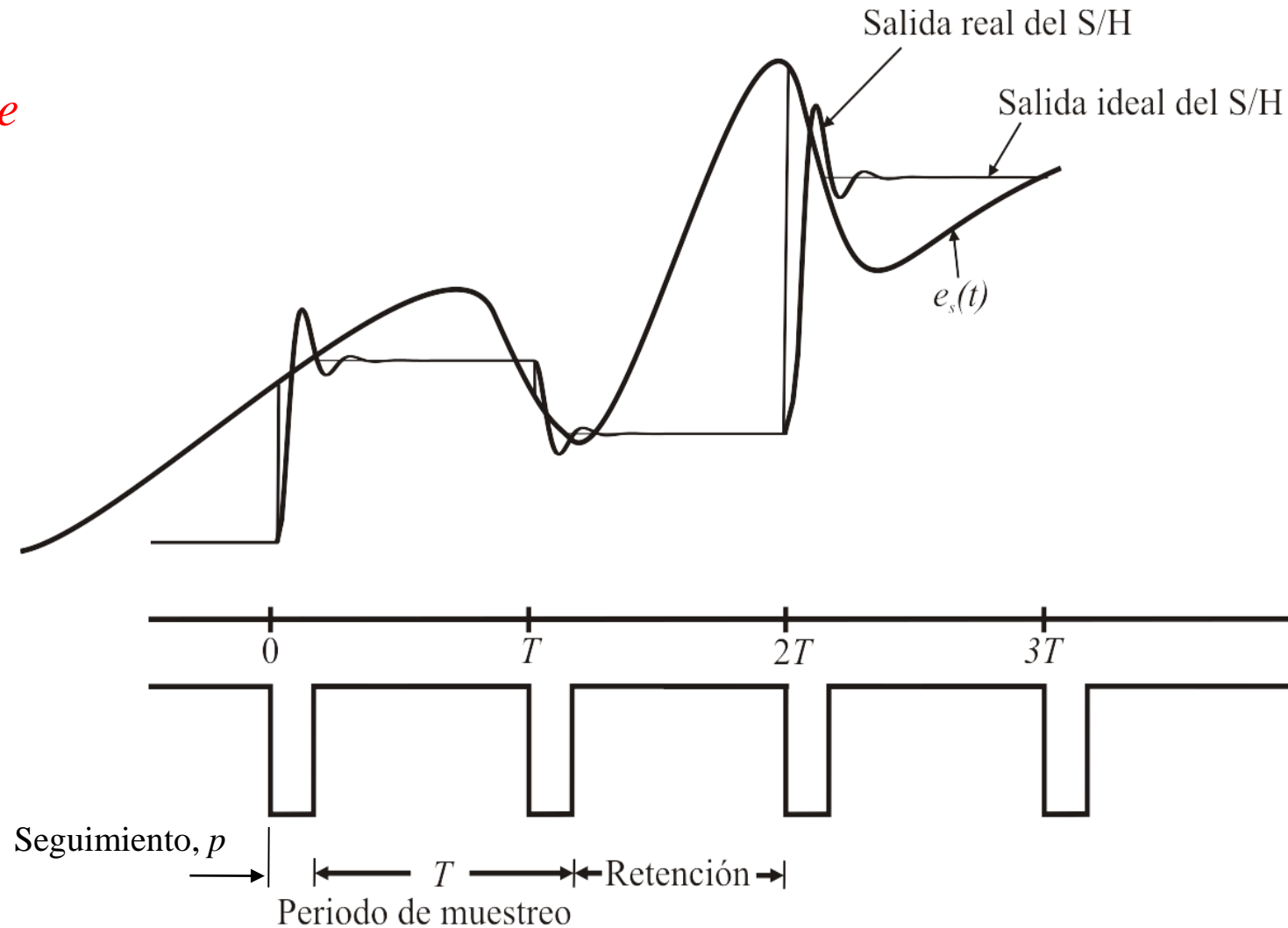
T_p : Tiempo de apertura

T_s : Tiempo de asentamiento

Atenuación en Modo Retención

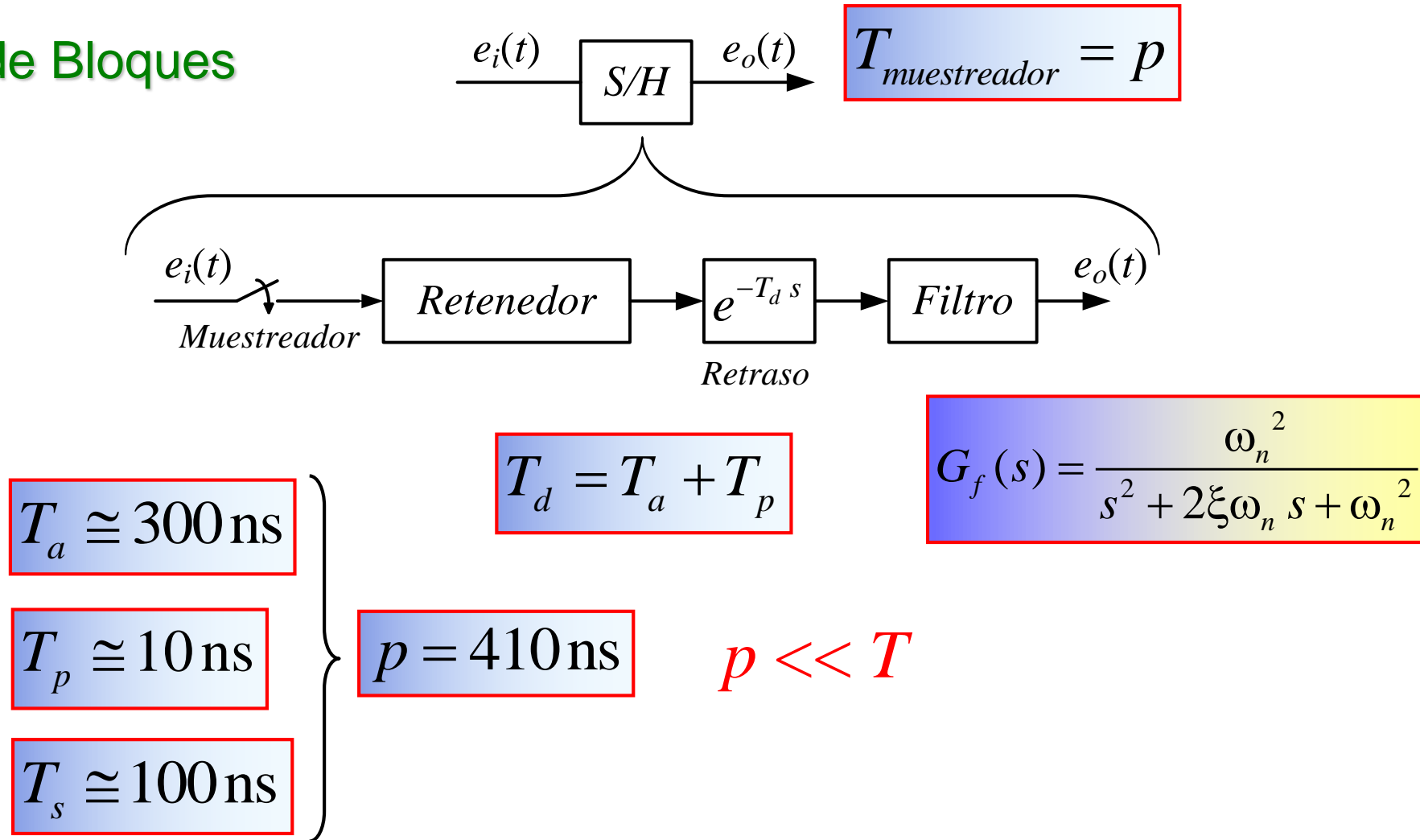
Muestreo y Retención

Frecuencia de Muestreo Uniforme

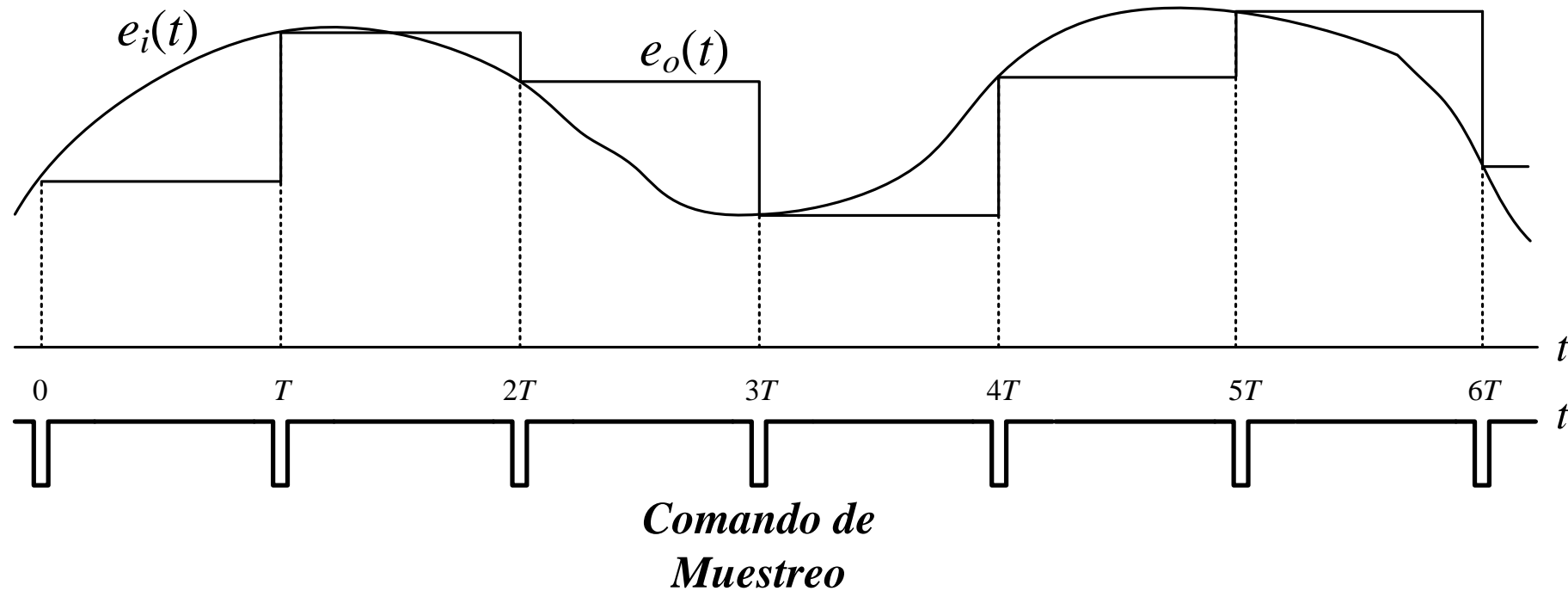


Muestreo y Retención

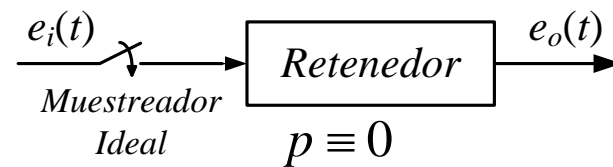
Diagrama de Bloques



Muestreo y Retención

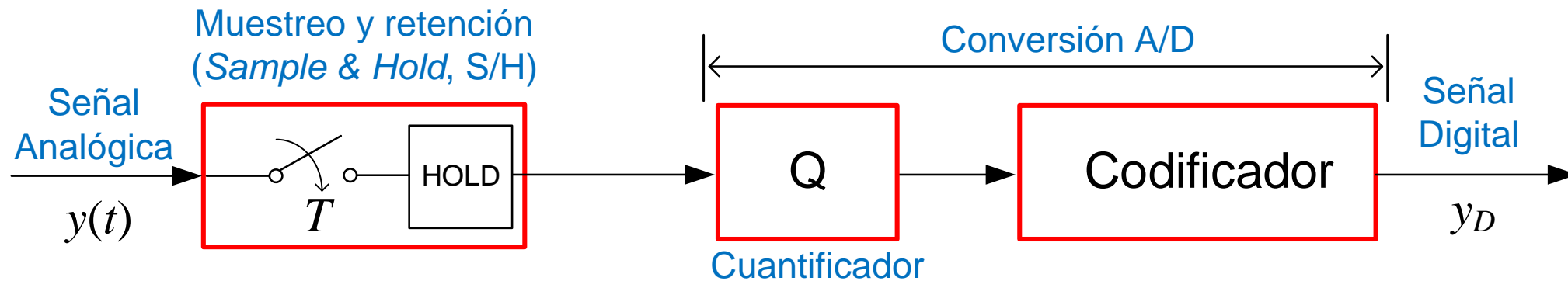


Circuito Ideal



Modulador de Amplitud de Pulsos

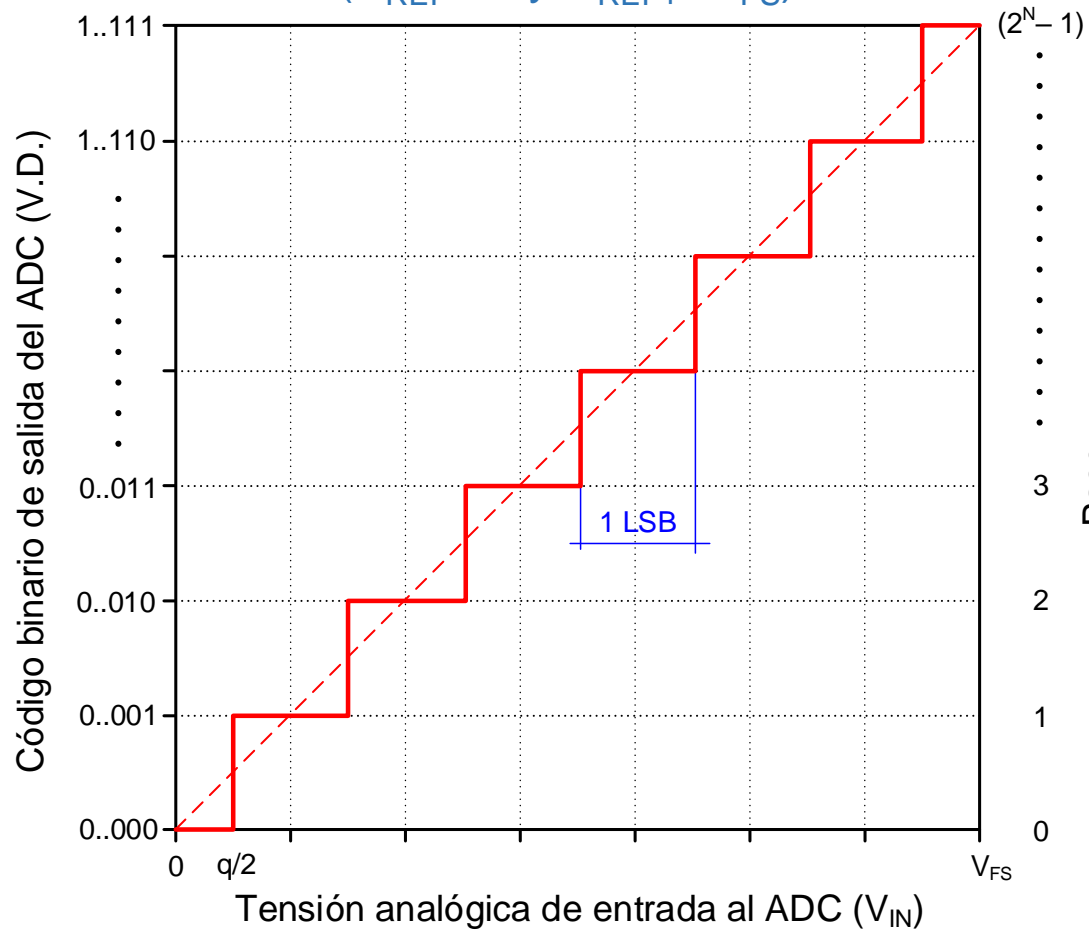
Conversión Analógica a Digital



- ❑ Es un proceso de conversión que se realiza en un tiempo finito, de aquí la importancia de la retención de la señal adquirida.
- ❑ Existen diferentes métodos:
 - ADC paralelo o flash: Circuito complejo; Costo elevado; Alta velocidad de conversión.
 - ADC por escalera o rampa digital: Circuito sencillo; Velocidad que depende de la amplitud de la entrada.
 - **ADC por aproximaciones sucesivas:** Circuito sencillo; Velocidad que NO depende de la amplitud de la entrada; Ampliamente usados en uC's y DSC's.
 - ADC por integración (simple y doble rampa): Circuito sencillo; Baja velocidad; Inmunes al ruido.
 - ADC Sigma-Delta: Circuito complejo; Costo elevado; Muy buena precisión.
- ❑ Pueden encontrarse conversores A/D desde 8 hasta 24 bits.
- ❑ A mayor N° de bits se incrementa la complejidad del circuito, resultando más costosos y mas lentos pero con mayor exactitud en la conversión (mayor resolución).

Conversión Analógica a Digital: Cuantificación

Relación entrada-salida en un ADC de N bits
($V_{REF-}=0$ y $V_{REF+}=V_{FS}$)



Dado el N° finito de niveles, el valor analógico resulta en una aproximación cuando se convierte a una señal digital.

Valor digital de salida: $N = N^{\circ}$ de bits del ADC

$$\text{Valor Digital} = \frac{(2^N - 1) \times (V_{IN} - V_{REF-})}{V_{REF+} - V_{REF-}}$$

Resolución:

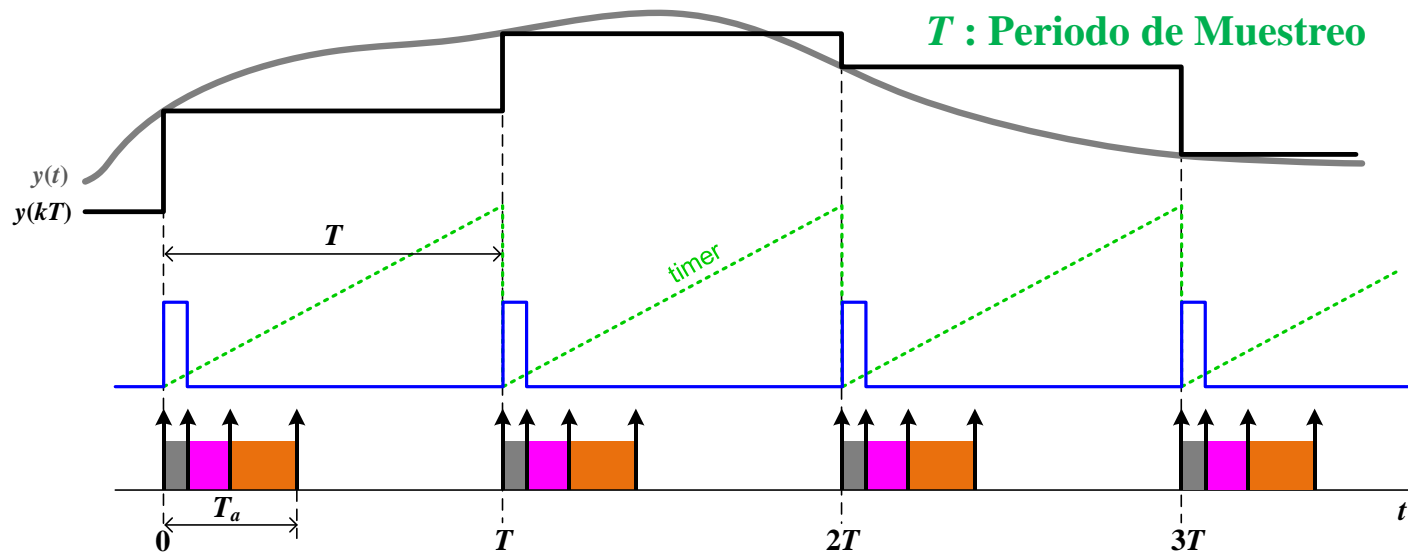
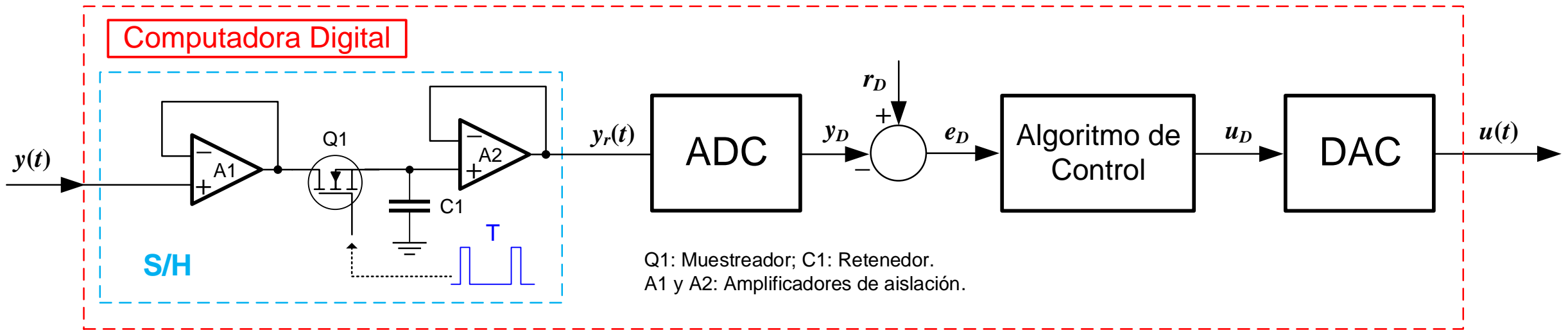
$$q = \frac{V_{REF+} - V_{REF-}}{(2^N - 1)} = 1\text{LSB}$$

Nivel de cuantificación: Intervalo entre dos puntos adyacentes de decisión. Es el bit menos significativo.

Error máximo:

$$\text{error}_{\max} = \pm \frac{1}{2} q$$

Tiempos inherentes al Control Digital



- **Tiempo de Adquisición (T_{adq}):** Durante este intervalo de tiempo el muestreador Q1 se cierra y así conecta a la entrada analógica con el retenedor C1. De esta forma, el capacitor “copia” el valor de la señal de entrada $y(t)$.
- **Tiempo de Conversión A/D (T_{adc}):** Una vez “copiado” el valor de $y(t)$, el muestreador Q1 se abre y C1 retiene el valor mencionado para que pueda efectuarse la conversión A/D. Una vez finalizada la conversión, se obtiene el valor binario “ y_D ” correspondiente a la señal $y(t)$.
- **Tiempo de Cálculo (T_{calc}):** Durante este intervalo de tiempo se calcula el error “ e_D ” y mediante el algoritmo de control se obtiene el valor binario de la acción de control “ u_D ”.

El intervalo de tiempo “ T_a ” constituye un atraso en la actualización de la acción de control “ $u(t)$ ”, con respecto a los sistemas de control analógicos, donde esto es prácticamente instantáneo. El atraso “ T_a ” puede tener efectos negativos sobre la estabilidad del sistema de control.

Características de algunos dispositivos

Microcontroladores (uC's):

PIC18F4550:

- CPU de 8bits; puede operar a 12MIPS.
- ADC de aprox. sucesivas de 10bits; 13 canales; tiempo total de adquisición y conversión: 11us (90ksps por canal).

ATmega328P (Arduino UNO):

- CPU de 8bits; puede operar a 20MIPS.
- ADC de aprox. sucesivas de 10bits; 6 canales; tiempo total de adquisición y conversión: 13us (76,9ksps por canal).

ATmega2560 (Arduino MEGA):

- CPU de 8bits; puede operar a 16MIPS.
- ADC de aprox. sucesivas de 10bits; 16 canales; tiempo total de adquisición y conversión: 13us (76,9ksps por canal).

PIC24EP128GP202:

- CPU de 16bits; puede operar a 70MIPS.
- ADC de aprox. sucesivas de 12bits; 6 canales; tiempo total de adquisición y conversión: 1,65us (500ksps por canal).

SAM3X8E (Arduino DUE):

- CPU de 32bits; puede operar a 1,5 DMIPS/MHz.
- ADC de aprox. sucesivas de 12bits; 16 canales; tiempo total de adquisición y conversión: 1us (1Msps por canal).
- DAC de 12bits; 2 canales; tiempo total de conversión: 500ns (por canal).

Características de algunos dispositivos

Controladores Digitales de Señal (DSC's):

dsPIC30F4011:

- CPU de 16bits; puede operar a 30MIPS.
- ADC de aprox. sucesivas de 10bits; 9 canales; tiempo total de adquisición y conversión: 1us (1Msps por canal).

TMS320F2812:

- CPU de 32bits; puede operar a 150MIPS.
- ADC de aprox. sucesivas de 12bits; 16 canales; tiempo total de adquisición y conversión: 80ns (12,5Msps por canal).





TMS320F28335:

- CPU de 32bits c/Unidad de Punto Flotante; puede operar a 150MIPS.
- ADC de aprox. sucesivas de 12bits; 16 canales; tiempo total de adquisición y conversión: 80ns (12,5Msps por canal).

TMS320F28377D Dual Core:

- Dos CPUs de 32bits c/Unidad de Punto Flotante; puede operar a 800MIPS.
- ADC de aprox. sucesivas de 12bits o 16bits (seleccionable); 16 canales; tiempo total de adquisición y conversión: 202ns (4,95Msps por canal, ADC de 12bits); 592ns (1,6Msps por canal, ADC de 16bits).
- DAC de 12bits; 3 canales; tiempo total de conversión: 2us (por canal).

Bibliografía

-  **SISTEMAS DE CONTROL DIGITAL, 1ed, Benjamín C. Kuo - Compañía Editorial Continental, 2002.**
-  **SISTEMAS DE CONTROL DE TIEMPO DISCRETO, 2ed, Katsuhiko Ogata - Prentice Hall, 1996.**
-  **DIGITAL CONTROL SYSTEM ANALYSIS AND DESIGN, Phillips, Charles L.; Tagle, Troy H.; Prentice Hall, Fourth Edition.**
-  **COMPUTER-CONTROLLED SYSTEMS, THEORY AND DESIGN, Aström, Karl J.; Wittenmark, Björn; Prentice Hall, Third Edition.**