



Contenido

ARQUITECTURA DE COMPUTACIÓN PARA IOT.....	2
ARM	4
Familias de procesadores ARM	4
SENSORES Y ACTUADORES	7
SENSORES	9
SENSORES INTELIGENTES	9
SENSORES RESISTIVOS.....	9
SENSORES CAPACITIVOS E INDUCTIVOS.....	11
SENSORES GENERADORES.....	11
ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL Y ADQUISICIÓN DE DATOS	12
ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES	13
ADQUISICIÓN DE DATOS	15
CONVERTIDOR ANALÓGICO DIGITAL.....	15
SEÑALES.....	17
SEÑALES DIGITALES, POLLING E INTERRUPTIONES	17
SEÑALES PWM.....	18
PROCESADO DIGITAL Y GENERACIÓN DE SEÑAL.....	19
GENERACIÓN DE SEÑAL.....	20
REFERENCIAS	21



ARQUITECTURA DE COMPUTACIÓN PARA IOT

Una de las primeras decisiones a tomar a la hora de desarrollar un producto electrónico embarcado es decidir cuál será la **arquitectura de computación** elegida, en particular, decidir si el producto se basa en un **microcontrolador**, un **microprocesador**, en **lógica programable** (FPGA, CPLD) o combinaciones de estos elementos.

En la actualidad hay dos arquitecturas de computación en la que se basan los dispositivos embarcados para Internet de las Cosas: microprocesadores y microcontroladores.

Los **microprocesadores** son circuitos digitales programables cuya finalidad es la de permitir la ejecución de **sistemas operativos** plenamente funcionales. Para ello ofrecen una elevada capacidad de ejecución de instrucciones y el acceso a grandes cantidades de memoria RAM mediante el uso de **buses externos** de conexión.

Mediante estos buses el microprocesador accede hoy en día a gigabytes de memoria RAM, necesarios para el correcto funcionamiento del sistema operativo y las aplicaciones que éste soporta. Entre los buses de conexión externa más habituales se encuentra la familia DDR (en la actualidad LP-DDR2, DDR3 y DDR4).

Los dispositivos que encontramos en los SmartPhones, tablets y PC son microprocesadores a los que se han conectado externamente abundantes recursos de memoria y tienen niveles de consumo del orden de varios en su funcionamiento normal. Como contrapartida pueden ejecutar sistemas operativos como Linux, Android, Windows o MAC OS X y todas las aplicaciones desarrolladas para estos sistemas operativos.

Los **microcontroladores** son dispositivos diseñados para incorporar en un mismo chip tanto el procesador (la CPU) como las memorias principales de programa (ROM/FLASH) y datos (RAM). Es decir, son soluciones muy compactas, económicas y sencillas de aplicar en muchas situaciones, pero también de menor rendimiento y mucho menor consumo.

Una de las consecuencias de esta característica esencial es que las cantidades de memoria de datos no son actualmente suficientes como para ejecutar un sistema operativo de propósito general como puede ser GNU/Linux, Android, FreeBSD, Windows o UNIX.

Por eso, en el contexto de los microcontroladores, se trabaja sin sistema operativo o con **sistemas operativos especiales**, que consumen muchos menos recursos y ofrecen menos servicios a los programadores de los S.O. de propósito general.



Los **criterios** para seleccionar entre una solución basada en microprocesador y una basada en microcontrolador son múltiples, no obstante, los más relevantes suelen ser:

- ✓ El nivel de **consumo energético** del que puede disponer el dispositivo y la disponibilidad o no de fuentes de energía apropiadas allí donde se va a situar.

Estas restricciones suelen provenir de la necesidad de operar a baterías, en exteriores o conectados a tensión alterna. Pero también hay imposiciones reglamentarias por el entorno en que el producto se utiliza, por ejemplo, si el producto va a emplearse en una atmósfera explosiva, la normativa ATEX puede imponer restricciones al dispositivo de tal forma que éste no tenga en ningún momento energía suficiente para realizar con éxito una deflagración.

- ✓ Naturaleza, cantidad, necesidades de **procesamiento** y tasas de transferencia de la información que gestiona el dispositivo.
- ✓ Las necesidades de **reconfiguración** del dispositivo en servicio y en qué medida se puede paralelizar la carga de trabajo que realiza.
- ✓ La conveniencia de disponer de los recursos de un **sistema operativo** de propósito general.
- ✓ El **coste unitario marginal** de producción, de operación y de mantenimiento del equipo.
- ✓ El **plazo y la inversión** necesarios para el desarrollo y puesta en funcionamiento.

El concepto de Internet de las Cosas es reciente y tiene muchas connotaciones e interpretaciones. En la práctica, en cuanto a los dispositivos electrónicos para IoT se refiere, existen algunas diferencias notables en el **modelo de referencia** en el mundo anglosajón (Norteamérica y Reino Unido fundamentalmente) y en Europa continental.

Para los **anglosajones** el modelo de referencia es el **Single Board Computer (SBC)**, es decir, un dispositivo embarcado con microprocesador que es funcionalmente equivalente a un PC, con abundantes recursos de procesamiento, almacenamiento, memoria y comunicación que puede ejecutar un sistema operativo de propósito general. En este sentido, las soluciones como Raspberry Pi (de origen británico), Intel Edison, Intel Galileo o Genuino (conocido en EEUU con el nombre Arduino) encajan en esta visión del SBC como elemento central de los dispositivos IoT.

En **Europa continental** solemos considerar como referencia para los dispositivos IoT los mismos dispositivos empleados en redes de sensores a los que se ha incorporado conexión directa a Internet.

Así pues, en Europa continental, el modelo de referencia de los dispositivos está basado en **microcontroladores conectados a Internet**. Según este punto de vista, las soluciones tipo Arduino (de origen italiano), mbed (de origen holandés) y muchas otras similares son el foco principal a la hora de desarrollar dispositivos IoT.



Nos centraremos en la puesta en funcionamiento de dispositivos con microcontroladores, en la interacción con su entorno más próximo para la recogida y entrega de información y en la comunicación exterior del dispositivo por los medios más habituales en productos IoT.

ARM

ARM es una empresa fundada en 1990 con sede en Cambridge, Reino Unido, que diseña CPUs, el elemento central de un procesador digital, y proporciona las herramientas de desarrollo para utilizar estas CPUs, como son los compiladores.

El modelo de negocio de ARM se basa en realizar **el diseño de las CPUs pero no la fabricación** de microcontroladores o microprocesadores físicos. ARM **licencia** sus CPUs para que sean otros fabricantes de circuitos integrados los que incorporan estas CPUs junto a otros muchos recursos periféricos para formar microcontroladores o microprocesadores, dando lugar a lo que conocemos como SoC (System-on-Chip).

Trabajaremos con microcontroladores fabricados por **NXP**, que integran en su interior una CPU ARM. Como consecuencia, algunos de los recursos de desarrollo son proporcionados por ARM al

estar directamente vinculados con la CPU y otros serán proporcionados por NXP que diseña y fabrica el chip y es quien aporta todos los demás recursos periféricos y accesorios aparte de la CPU.

Familias de procesadores ARM

ARM ofrece unas CPUs especialmente diseñadas para ser utilizadas en microprocesadores y otras CPUs para ser utilizadas en microcontroladores. Las **familias** más importantes en la actualidad son tres:

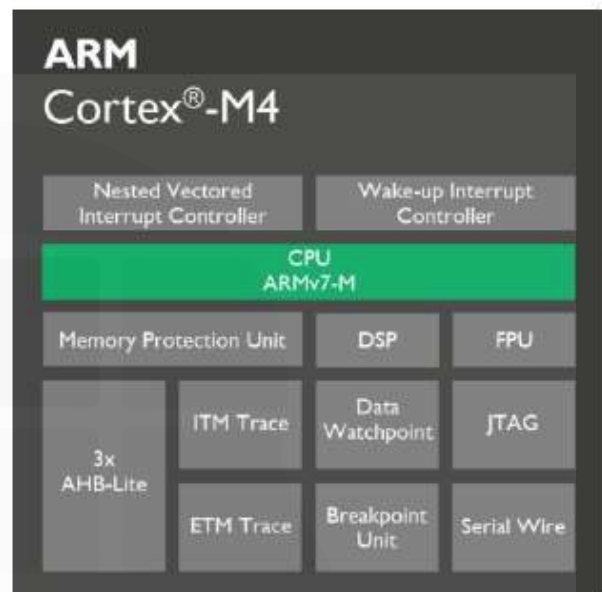
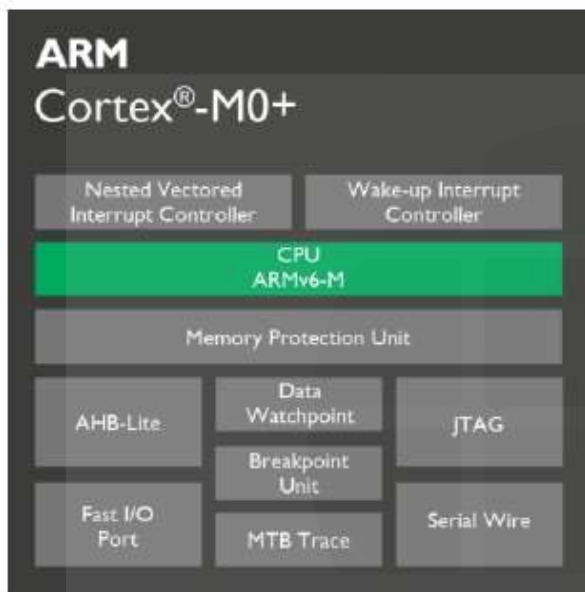
- ✓ **Cortex-A:** Son CPU para **microprocesadores** que pueden ejecutar sistemas operativos de propósito general como Linux o Android. Son muy habituales en Smartphones, tablets y routers. A principios de 2016 ARM disponía de 249 licenciarios de Cortex-A.
- ✓ **Cortex-R:** Son CPU optimizadas para aplicaciones en **tiempo real estricto**, utilizadas en aplicaciones de alta fiabilidad para garantizar la **seguridad de las personas**. A principios de 2016 ARM disponía de 69 licenciarios de Cortex-R.
- ✓ **Cortex-M:** Son CPUs para **microcontroladores** y aplicaciones de bajo consumo en general. Estos controladores se encuentran en dispositivos embarcados de monitorización y control y serán la base del estudio en las próximas unidades. A principios de 2016 ARM disponía de 378 licenciarios de Cortex-M.

Los procesadores ARM Cortex-M son CPUs para microcontroladores que se han diseñado para tener un **consumo muy reducido** y su utilización en aplicaciones embarcadas con conectividad, muy ligadas a IoT. Se han comercializado decenas de miles de millones de microcontroladores con estos procesadores y son la **referencia a nivel mundial** en microcontroladores de 32 bits.



La familia de Cortex-M son las siguientes:

- ✓ **Cortex-M0, Cortex M0+, y Cortex-M23** para el mínimo coste, consumo y tamaño
- ✓ **Cortex-M3, Cortex-M4, y Cortex-M33** para aplicaciones de mayor rendimiento y consumo moderado
- ✓ **Cortex-M7** para el máximo rendimiento de microcontrolador.





La variante **Cortex-M0/M0+** es el dispositivo de **menor consumo** y es el preferido cuando el dispositivo opera a **baterías**, sobre todo cuando ésta no es recargable (dispositivos a pilas), se recarga por cosecha energética o se requiere la máxima duración posible con una carga.

Por otro lado, el modelo **Cortex-M4** es mucho **más potente**, y permite realizar tareas de **cálculo procesamiento** más complejas, por lo que se prefiere en aplicaciones en las que el dispositivo va alimentado permanentemente (el consumo es menos crítico) y hace funciones más complejas como cuando ejerce de punto de acceso (**gateway**) o emplea comunicaciones complejas en aplicaciones IoT.

En esta unidad y las dos siguientes se empleará un microcontrolador basado en una CPU Cortex-M4 que incorpora, al igual que las familias Cortex-M7 y Cortex-M33, recursos adicionales para el **procesado digital de señales (DSP)** y una unidad de procesamiento en **punto flotante** de la que carecen los Cortex-M0/M0+.

Como consecuencia del modelo de negocio de ARM, que licencia sus procesadores, y de los buenos resultados que estos procesadores tienen, son muchos los fabricantes de circuitos integrados que ofrecen productos con CPUs ARM, ya sean microcontroladores o microprocesadores.

Estos fabricantes introducen la CPU ARM junto con otros muchos elementos adicionales en un único chip, dando lugar a un System-on-Chip (SoC) compuesto por la CPU, memorias, periféricos, recursos de programación, depuración y control.

Los fabricantes más importantes de SoC con procesadores incluyen a NXP, con las series LPCx, Kinetis e i.MX. STM con sus STM32, ATMEL con los productos SAM, o Texas Instruments con SITARA.

Las prácticas se realizan con microcontroladores **Kinetis**, una familia muy completa que abarca desde microcontroladores de menor consumo a opciones de alto rendimiento.



SENSORES Y ACTUADORES

En el proceso de desarrollo de un dispositivo IoT nos vemos en la necesidad de **interactuar** con el **entorno más próximo**, bien sea para recoger información o bien para modificar y adaptar el entorno según nuestras necesidades. En este apartado nos centramos en los **medios** por lo que un dispositivo IoT puede interactuar con su entorno más próximo, compuesto por sensores, actuadores y otros periféricos.

Comenzaremos por presentar algunos conceptos básicos de **sensores** y **actuadores** para revisar el proceso de **acondicionamiento** y **adquisición**. Introduciremos algunas técnicas básicas de **procesado digital de señales** e indicaremos los mecanismos principales de **generación** de señales. Comenzamos por unas definiciones básicas:

- ✓ **Transductor:** Es todo dispositivo que convierte una señal de una naturaleza física a otra señal con una naturaleza física distinta. Los transductores en los que nos centraremos son los que trabajan con una magnitud física de interés por un lado y con una señal eléctrica por otro.
- ✓ **Actuador:** Transductor de salida, es decir, dispositivo que convierte una señal eléctrica que generamos por medios electrónicos en una señal de otra naturaleza física. Motores de todo tipo (paso a paso, servos), altavoces, relés, LEDs y pantallas LCD son ejemplos comunes de actuadores.
- ✓ **Sensor:** Transductor de entrada, es decir, son dispositivos que convierten una magnitud física de interés de una señal eléctrica que podemos observar. Los termistores, termopares, fotodiodos y acelerómetros son ejemplos comunes de sensores.

En consecuencia, los sensores nos ofrecerán información del entorno en el que el dispositivo se encuentra, los actuadores nos permiten modificar dicho entorno.

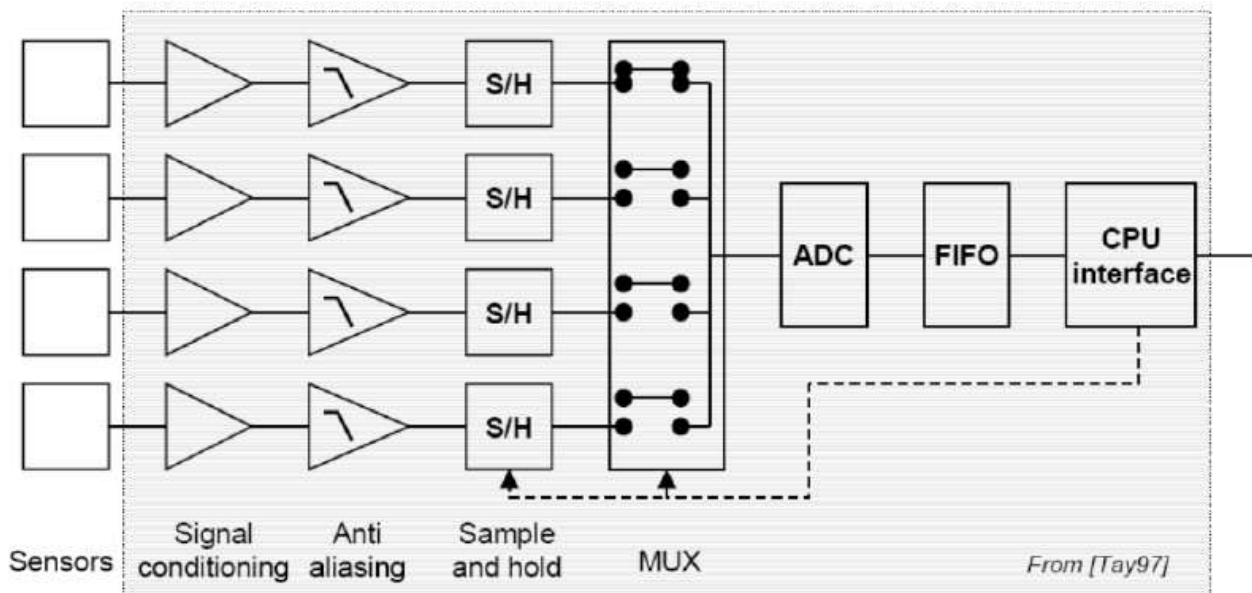
Muchos de los sensores y actuadores actuales son **inteligentes**, por lo que la información que nos proporcionan ya está en el **dominio digital** y sólo es necesario **acceder** a ella desde el microcontrolador para su posterior procesamiento.

Sin embargo, en otras situaciones los sensores ofrecerán señales en el **dominio analógico** y debemos realizar un proceso de **acondicionamiento** y **adquisición** para poder disponer de su información en el dominio digital.

Equivalentemente, muchos actuadores son digitales, pero en otras ocasiones las señales que requiere el actuador son analógicas y debemos **generarlas** mediante un proceso de conversión digital-analógica (un altavoz, por ejemplo).



El esquema general de un sistema de acondicionamiento y adquisición de señales procedentes de sensores se muestra en la figura



Para utilizar eficazmente sensores y actuadores disponemos de técnicas que nos facilitan los siguientes procesos:

- ✓ **Acondicionamiento de señales**, proceso por el que se adaptan las señales que ofrecen los sensores para que puedan ser digitalizadas correctamente.
- ✓ **Adquisición de datos**, proceso por el que una señal es convertida al dominio digital.
- ✓ **Procesado digital de señales**, proceso por el que se altera la señal, utilizando medios digitales, con el objetivo, entre otros, de mejorar su transmisión, almacenamiento o interpretación posterior.
- ✓ **Reconstrucción de señales**, proceso por el que obtenemos una señal analógica a partir de los datos digitales que la representa.



SENSORES

En este apartado realizaremos una presentación de diferentes **tipos de sensores**, atendiendo a su **naturaleza eléctrica**. En particular son muy interesantes para aplicaciones de IoT los **sensores inteligentes**, por su extensión, variedad y prestaciones. No obstante, otros sensores requerirán de un proceso de acondicionamiento y adquisición que influirá en la medida que podemos observar y que es necesario conocer para poder interpretar los datos obtenidos correctamente.

SENSORES INTELIGENTES

Son dispositivos que combinan un elemento sensor con la electrónica necesaria para el acondicionamiento y adquisición de datos. Como consecuencia, son sensores que ofrecen una interfaz digital directamente accesible por un microprocesador o microcontrolador. Los sensores inteligentes constituyen una categoría de gran interés ya que se cada vez son más los sensores que se ofrecen comercialmente con acondicionamiento y adquisición integrada.

Estos sensores permiten habitualmente el ajuste del sistema de acondicionamiento y adquisición interno para adecuarlo a la aplicación (control de ganancia, rango, resolución, etc.) y pueden permitir la realización de calibraciones y correcciones por medios digitales.

Los sensores inteligentes suelen incorporar un interfaz SPI o I2C, que proporciona un medio de acceso a registros internos de 8 bits, tanto en lectura como escritura, a través de los que se realizan todas las operaciones de obtención de datos, configuración y control.

Buena parte de los sensores estudiados en los talleres serán sensores inteligentes, siendo muy importante poder desarrollar el código necesario para interactuar con un sensor inteligente a partir de su hoja de especificaciones y los recursos asociados proporcionados por el fabricante.

SENSORES RESISTIVOS

Son sensores que emplean como magnitud eléctrica la **resistencia**, que **varía** en función de la magnitud física que miden. Son muy comunes y diversos y permiten acceder a un conjunto amplio de magnitudes físicas. Todos los sensores resistivos necesitarán de una **excitación externa** para generar una señal eléctrica en tensión o corriente. Los tipos más comunes de sensores resistivos son:

- ✓ **Potenciómetros:** Es una resistencia con un contacto móvil, denominado **cursor**, que puede ser **deslizante** o **giratorio**, dando lugar a medidas de posición lineal o angular.
- ✓ **Galgas extensiométricas:** Son sensores resistivos que se fundamentan en efecto **piezo resistivo**, que es la variación de la resistencia por efecto de un **esfuerzo mecánico**. Suelen ser aleaciones metálicas, sufren deformaciones de micrómetros y su salida en señal es de muy bajo nivel, por lo que requieren amplificación.



- ✓ **Detectores de Temperatura Resistivos (RTD)**, se fundamentan en la medida de temperatura por el aumento de la resistividad de los **metales** cuando aumenta la temperatura. Las más habituales son las de **platino**, en particular la **Pt100**, que ofrece una resistencia de **100 ohm a 0 °C**, puede medir temperaturas de -200 °C a +800 °C.
- ✓ **Termistores**. A diferencia de los RTD, no están basados en metales (conductores) sino en **semiconductores**, y como consecuencia la dependencia entre resistencia y temperatura es **fuertemente no lineal**, pero con **más sensibilidad** que las RTD.

Existen dos tipos, las **PTC** (Positive Temperature Coefficient), que **aumenta** la resistencia con la temperatura y las **NTC** (Negative Temperature Coefficient) que **disminuye** la resistencia con la temperatura, siendo **más comunes y económicas**.

- ✓ **Magnetorresistencias**: Miden un **campo magnético** mediante la variación en la resistencia que sufre un conductor por el que circula una corriente. La relación resistencia-campo magnético es **cuadrática** (no son lineales). Se utilizan, por ejemplo, en lectores de bandas magnéticas.
- ✓ **Fotorresistencias**: Son resistencias variables por efecto de la **absorción de luz**. Se emplean **semiconductores** que al absorber **fotones** disminuyen la resistividad. Son medidores **poco precisos** de luz, como los detectores de luz ambiental.
- ✓ **Higrómetros resistivos**: Son medidores de **humedad relativa**, en este caso particular mediante la medida de resistencia (puede ser también capacitivos). Se fundamentan en la disminución de resistividad de un material por absorción de humedad.



SENSORES CAPACITIVOS E INDUCTIVOS

Tienen la particularidad de poder realizar la medida **sin estar en contacto físico** con el sistema a medir. Requieren de una **señal alterna**, en general, a una determinada **frecuencia** lo que limita la frecuencia máxima de la magnitud a medir.

Los más habituales son los **condensadores variables**, que alteran la posición relativa de las dos placas conductoras que lo forman. Como consecuencia, miden también otras magnitudes que pueden convertirse en desplazamientos, como **aceleración, presión, fuerza o par**. Son buenos como medidores de **nivel de líquidos** tanto conductores como no conductores.

Los sensores **inductivos** suelen basarse en un **elemento móvil** en el interior de una bobina sobre la que circula una corriente altera. Se emplean como detectores de **posición** y de **proximidad** de objetos metálicos, entre otros usos.

SENSORES GENERADORES

Los sensores generadores tienen como particularidad que pueden proporcionar una **señal eléctrica** observable **sin necesidad de excitación** eléctrica exterior. Se basan en efectos físicos **reversibles**, por lo que suelen ser tener usos como actuadores. Son una familia de sensores muy habituales, entre los que encontramos:

- ✓ **Termopares:** Generan una **tensión** en circuito abierto o una corriente en cortocircuito como consecuencia de la aplicación de una **diferencia de temperatura** entre **dos uniones de dos metales distintos**
- ✓ **Piezoeléctricos:** Ofrecen una **tensión** como efecto de la **presión mecánica** que se ejerce sobre ellos. No tienen respuesta en continua, **sólo en alterna** y pueden requerir de atenuación por la existencia de resonancias subamortiguadas. Se emplean en la medida de **esfuerzos y vibraciones**.
- ✓ **Fotovoltaicos:** Se emplean en **medidas de luz** en todas las magnitudes que pueden derivar en medida de luz.



ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL Y ADQUISICIÓN DE DATOS

En esta sección hacemos una presentación breve de los **términos** más importantes en relación al proceso de **acondicionamiento y adquisición** de datos. El objetivo es conocer los parámetros y métodos que se utilizan a la hora de realizar una medida de una magnitud analógica.

Comenzamos con unas definiciones que nos permiten distinguir entre diferentes **figuras de mérito** en la medida de una magnitud física:

- ✓ **Exactitud:** Es una cualidad que, aplicada a una medida, estima cómo de aproximado es el valor aportado por la medida con respecto al verdadero valor de la magnitud que se desea medir.
- ✓ **Error:** En la medida, es la diferencia entre el valor aportado por el instrumento de medida y el verdadero valor de la magnitud.
- ✓ **Resolución:** Indica el cambio mínimo de la magnitud física de entrada que puede ser detectado en la magnitud de salida.
- ✓ **Precisión:** Es un concepto que indica la repetibilidad y reproducibilidad de una medida, esto es, la capacidad que tiene el instrumento de ofrecer el mismo valor observado ante un mismo estímulo en medidas sucesivas.

Calibración: Es un proceso de comparación por el que se ajusta y caracteriza un sensor o instrumento de medida. En este proceso se expone el sensor o instrumento a un conjunto de señales de entrada conocido y se comparan las medidas aportadas por el sensor o instrumento en calibración con el conjunto de medidas obtenidas por otro instrumento que se toma como referencia o “standard”. Por esta comparación se puede corregir y ajustar un instrumento para que su funcionamiento se aproxime en lo posible al del estándar empleado en la calibración.

Es importante distinguir bien entre **exactitud, resolución y precisión**. Supongamos que sabemos que la temperatura de un dispositivo es de 24.6 °C y medimos con un termómetro de 0.2 °C de resolución y que nos ofrece una lectura estable de 25.5 °C.

La precisión del termómetro es del orden a ± 0.05 °C o inferior, al ofrecer una lectura estable (sin variaciones entre medidas sucesivas) al menos con una única cifra decimal.

Este concepto es diferente de la exactitud, pues la temperatura real es 24.6 °C y la diferencia, 0.9 °C, es error en la medida. La resolución es de 0.2 °C, e indica el cambio mínimo que nuestro instrumento es capaz de observar, por lo que no observaremos un cambio en la lectura que ofrece



el termómetro hasta que la temperatura real haya cambiado en ± 0.2 °C, esto es, se alcance 24.4 °C ó 24.8 °C.

ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

Trabajar directamente con sensores analógicos puede requerir realizar un proceso de **adaptación** para que las señales del sensor puedan ser procesadas correctamente por el convertidor analógico/digital.

Algunos sensores proporcionan señales de amplitudes muy bajas que necesitan ser amplificadas, en otras situaciones los sensores requieren de una excitación externa para su funcionamiento. Entre los **procesos básicos** de acondicionamiento citamos los más comunes:

- ✓ **Amplificación:** Aumentan el nivel de la señal para adaptarse mejor a la conversión analógica digital posterior. Como consecuencia de una señal mayor, se obtiene una mayor **sensibilidad** (mayor cambio en la medida para el mismo cambio en la magnitud física), y mejora la **resolución**. Los termopares suelen requerir amplificación por ofrecer señales de muy baja amplitud.
- ✓ **Atenuación:** Es el procedimiento inverso a la amplificación y es necesaria cuando la señal de salida del sensor excede los márgenes máximos del circuito de adquisición. La atenuación evita que se produzca saturación, un efecto no lineal que destruye parcialmente la señal de interés.
- ✓ **Filtrado:** Los filtros discriminan y atenúan el ruido (o señal superpuesta no deseada) dentro de un rango de frecuencias. Muchas medidas se pueden ver afectadas por ruido de mayor frecuencia.
- ✓ **Aislamiento:** Si una señal de entrada se encuentra a tensiones muy diferentes de las de trabajo del equipo de medida puede dañar al sistema. Esto ocurre a menudo cuando la señal de interés tiene una tensión de referencia (tierra) distinta. El aislamiento consigue acoplar señales con diferencias muy grandes en su nivel de referencia con seguridad, protegiendo al sistema y a las personas que operan con él.
- ✓ **Excitación:** Muchos sensores y actuadores requieren de una señal externa para funcionar correctamente. Por ejemplo, acelerómetros, termistores y RTDs requieren tensiones externas o corriente de excitación.
- ✓ **Linealización:** La linealización es un proceso por el que se trata de convertir la respuesta de un sensor no lineal en una función de transferencia lineal. Un termopar es sensor que requiere linealización.



En la práctica, el acondicionamiento de señal forma parte de las tareas propias de la ingeniería electrónica cuando se quiere hacer uso de un sensor analógico. En etapas de prototipado, se puede hacer uso de bloques amplificadores comerciales e instrumentos de laboratorio para la puesta en funcionamiento de los sensores.





ADQUISICIÓN DE DATOS

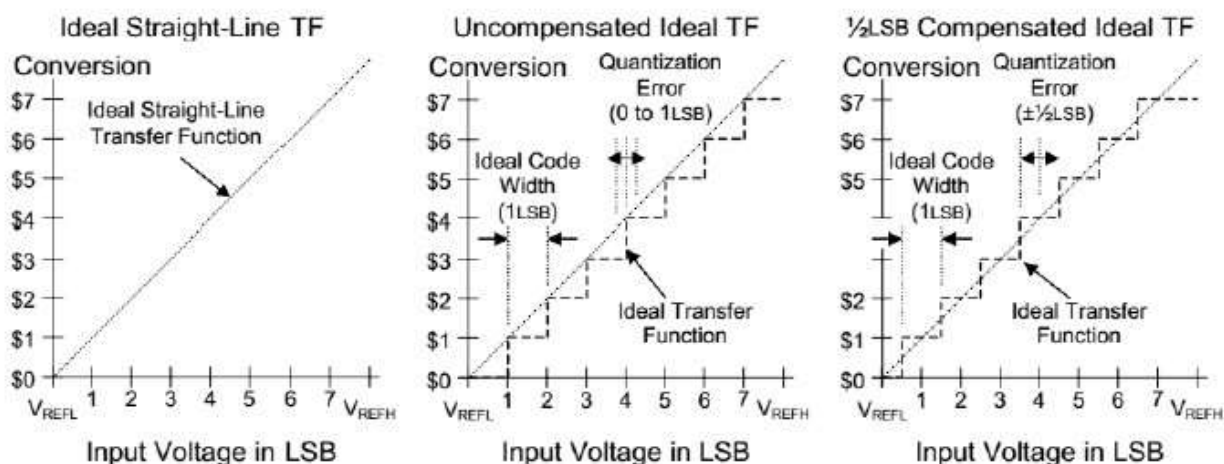
CONVERTIDOR ANALÓGICO DIGITAL

El proceso de conversión de una señal analógica a digital conlleva dos transformaciones sucesivas: el muestreo y la cuantificación.

Muestreo: Es el proceso por el que se discretiza el **eje temporal** de la señal, convirtiéndola en un tren de pulsos, o señal PCM (Pulse Code Modulation). El mecanismo básico es el denominado muestreo y retención (**simple & hold**) que almacena en una capacidad el valor analógico instantáneo. El resultado de este proceso es una señal que sólo cambia de valor en instantes concretos del eje temporal, y se mantiene constante hasta el siguiente instante de muestreo, determinado por el periodo de muestreo. El valor de amplitud que toma la señal en cada periodo de muestreo es analógico.

Cuantificación: Este proceso **aproxima** el valor de amplitud que toma la señal muestreada por un valor digital. La distancia entre dos niveles consecutivos se conoce como LSB (Least Significant Bit). El resultado de este proceso es un **dato binario** que representa el nivel de amplitud más próximo al valor analógico de la señal. Este proceso conlleva la introducción de un error, el **error de cuantificación**, por la diferencia que existe entre el valor analógico de entrada y el nivel cuantificado más próximo.

Este error está comprendido entre 0 y 1 LSB si el convertidor A/D emplea una función de transferencia no compensada, o de ± 0.5 LSB en caso de utilizar compensación. El error **disminuye** con el **número de bits por muestra** y con el **rango dinámico** (la diferencia entre el nivel más alto y más bajo que admite la etapa de cuantificación).







SEÑALES

SEÑALES DIGITALES, POLLING E INTERRUPCIONES

Cuando trabajamos con periféricos digitales simples (como un encoder, pulsadores o switches) la información que nos ofrecen estos dispositivos se encuentra en el **estado lógico** y las **transiciones** de unas pocas señales digitales, que funcionan a **baja frecuencia** en relación a la frecuencia de ejecución de instrucciones del microcontrolador.

En el caso de señales digitales simples existen dos técnicas básicas para su detección, el **polling** y las **interrupciones**.

La observación mediante **polling** consiste simplemente en **leer** el estado lógico de las señales de interés **continuamente**, en un bucle, comprobando en cada iteración si el estado de las señales cambia para iniciar los procedimientos asociados con ese nuevo estado. Por ejemplo, si un pulsador nos ofrece una señal digital activa en estado bajo, se lee el valor de esta señal constantemente, comprobando si en algún momento toma el valor lógico 0, en cuyo caso se lanza el proceso asociado a la pulsación y el proceso se repite indefinidamente.

Este proceso de polling es **muy simple** pero **muy ineficiente**, pues requiere estar constantemente pendiente de leer y comprobar el estado de las señales, lo que dificulta, por ejemplo, un funcionamiento en bajo consumo del dispositivo.

Un procedimiento alternativo más eficiente es el de las **interrupciones**. En este caso, se indica al microcontrolador que genere una interrupción cuando la señal de interés presenta un flanco (un cambio) del estado lógico inactivo al estado lógico activo (en el caso del pulsador, cuando cambia de 1 a 0). La interrupción provoca un salto en el flujo de ejecución de la CPU del microcontrolador, que deja de ejecutar el programa principal y salta a una función especial, la **rutina de servicio de interrupción**, tras la detección de la condición de interrupción. En el ejemplo del pulsador, es en esta rutina se inician los procedimientos asociados a la pulsación.



SEÑALES PWM

Un mecanismo sencillo para comunicar información digital entre un periférico y el microcontrolador es a través de señales PWM (**Pulse Width Modulation**). Estas señales transmiten la información útil bien modificando la **anchura del pulso** de una señal digital de **frecuencia constante** o bien modificando tanto el pulso como el periodo de la señal digital.

Para **extraer** la información útil en estas señales se puede utilizar el mecanismo visto para señales digitales simples, pero resulta tedioso porque no sólo hay que detectar los flancos de la señal, sino que también hay que medir el tiempo entre dichos flancos.

Para estos procesos, muchos microcontroladores incorporan recursos especiales para esta tarea, que se denomina **captura de pulsos**. Estos recursos suelen ser funcionalidades adicionales de los **temporizadores internos** del microcontrolador, que se encargan de **detectar los flancos** y calculan automáticamente el ancho del pulso o su frecuencia.



PROCESADO DIGITAL Y GENERACIÓN DE SEÑAL

Una vez disponemos de la señal en el dominio digital, podemos realizar múltiples procesos para modificar la señal según el tipo de medida o estimación queramos realizar.

El campo del procesamiento digital de señal es extenso y muy potente, aquí sólo enunciaremos una serie de recursos que están a disposición de los ingenieros a través de la biblioteca **CMSIS-DSP** proporcionadas por ARM. Esta biblioteca añade a todos los microcontroladores ARM recursos específicos para el procesamiento digital de señales. En primer lugar añade soporte a los siguientes tipos de datos:

- Números en **punto fijo**, útiles en microcontroladores sin soporte hardware de punto flotante, como los Cortex-M0+, ya que representan valores decimales utilizando aritmética de números enteros.
- Números **complejos**
- **Vectores y Matrices**

Además de los tipos de datos, ofrece **funciones** para la ejecución de tareas relacionadas con el procesamiento de señal como son:

- ✓ Funciones matemáticas básicas sobre vectores de números reales y complejos
- ✓ Filtros, incluyendo convolución, correlación, FIR, IIR y LMS
- ✓ Operaciones matriciales
- ✓ Transformadas, FFT y DCT
- ✓ Control, PID, transformadas Clarke y Park
- ✓ Funciones estadísticas
- ✓ Funciones de interpolación lineal y bilineal La utilización de **actuadores** requiere de la **generación de señal** por parte del dispositivo, en nuestro caso un microcontrolador. El método de generación depende de si las señales a generar son digitales o analógicas, y de sus características.

En el caso de **señales digitales**, los métodos más utilizados son:

- ✓ Señales **GPIO** simples (individuales) o en bus (agrupaciones en paralelo).
- ✓ Señales **PWM**. Puede generarse una señal PWM mediante GPIOs y temporizadores. Sin embargo, es más eficaz utilizar periféricos especiales para generación de PWM, que generan la señal sin intervención de la CPU (que puede entrar en modos de bajo consumo) y permiten modificar fácilmente periodo y ciclo de trabajo.



GENERACIÓN DE SEÑAL

En el caso de **señales analógicas**, existen dos mecanismos básicos para obtener una salida analógica, el convertidor analógico-digital y la generación PWM.

El **convertidor digital-analógico**-(DAC) es un dispositivo de **señal mixta** (combina señal analógica y señal digital) cuya misión es la de reconstruir la señal analógica a partir de una secuencia de muestras digitales, generando una señal PCM (escalonada) a partir de los datos de entrada. Tras el convertidor digital-analógico suele ser necesario un filtro paso-bajo denominado **filtro de interpolación**, que se encarga de eliminar el carácter escalonado provocado por las frecuencias más altas.

En el **caso particular de** necesitar generar valores de tensión analógica **continua** o de **baja frecuencia**, se pueden emplear las propiedades de las señales **PWM**, combinadas con un filtrado paso bajo. Una señal PWM tiene un **valor de continua**(DC) proporcional a la tensión de alimentación. El factor de proporcionalidad es el **ciclo de trabajo**, que es la fracción del periodo de la señal en que ésta tiene valor lógico 1.

Si se dispone de una señal PWM a 3.3V con un ciclo de trabajo del 25% (25% del tiempo en estado alto, 75% del tiempo en estado bajo), el valor de continua de esta señal es igual a $0.25 * 3.3V$. Si el ciclo de trabajo cambia al 80%, el valor de continua cambiará a $0.8 * 3.3V$. Para **recuperarla** señal analógica a partir de la señal PWM generada, es necesario eliminar las componentes de mayor frecuencia mediante un **filtro paso-bajo**.

Este filtrado será tanto más eficaz cuanto más alta es la frecuencia de la señal PWM. Por otro lado, cuando más alta es la frecuencia PWM, más pequeño es su periodo y como consecuencia empeora la resolución con la que se puede determinar el ciclo de trabajo. Esto establece un **compromiso** en la elección de la **frecuencia** de la señal PWM más adecuada.

Mg. Ing. Marcos Politi



REFERENCIAS

Maestría en Internet de las Cosas Universidad de Salamanca.

http://www.cisco.com/c/dam/global/es_mx/solutions/executive/assets/pdf/internet-of-things-iot-ibsg.pdf

http://www.future-internet.eu/fileadmin/documents/reports/Cross-ETPs_FI_Vision_Document_v1_0.pdf

<https://www.computer.org/csdl/mags/ic/2013/04/mic2013040018-abs.html>

<http://www.domodesk.com/a-fondo-que-es-el-internet-de-las-cosas>

<http://ecixgroup.com/el-grupo/una-aproximacion-algunos-elementos-de-internet-de-las-cosas/>