

Capítulo 1

Introducción

El presente informe busca dar a conocer al lector las tareas y actividades desarrolladas por el autor, en el marco del Trabajo Final de la carrera Ingeniería Electrónica, dictada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan. El objetivo del trabajo es diseñar e implementar una interfaz para la transmisión de datos hacia una computadora personal (PC), adquiridos por sistemas desarrollados en arreglos de compuertas de campo programables (FPGA) para aplicaciones científicas, a través del Bus Serial Universal (USB). A lo largo de este documento, se comprenderá la problemática que se resuelve y la configuración, fundamentos y modo de uso del sistema propuesto.

En la sección 1.1 se presentan las motivaciones de este trabajo y se detalla la problemática a resolver. Luego, se detallan los objetivos que persigue este trabajo. Seguido a esto, se otorga un esquema que describe la solución planteada y se justifica el protocolo elegido. Finalmente, se repasan algunos conceptos importantes de la norma USB que luego se utilizan en el trabajo desarrollado.

1.1. Motivación

El grado de avance que han experimentado la electrónica y la tecnología en general, gracias a la industria de los semiconductores, permite que la producción científica pueda adquirir una gran cantidad de datos. Para llevar a cabo la producción del conocimiento, es necesario el relevamiento y registro de diferentes tipos de magnitudes físicas y/o químicas sobre el objeto o proceso a investigar. En muchas ocasiones, estas magnitudes resultan difíciles de observar y cuantificar, por lo que es conveniente transformar las variables a conocer en otras más sencillas de medir. Para este propósito, se utilizan transductores.

Se conoce como transductor a cualquier dispositivo que recibe estímulos energéticos de una condición, situación o fenómeno físico y/o químico y los convierte en una señal asociada y definida de otra forma de energía[1, 2]. En otras palabras, los transductores son conversores de energías[1, 2, 3]. Se denomina sensor a una clase particular de transductor que genera, como variable de salida, una señal eléctrica que está especialmente adaptada para ser ingresada en un circuito electrónico, o adecuada al sistema de medida que se utilice [4, 5, 6].

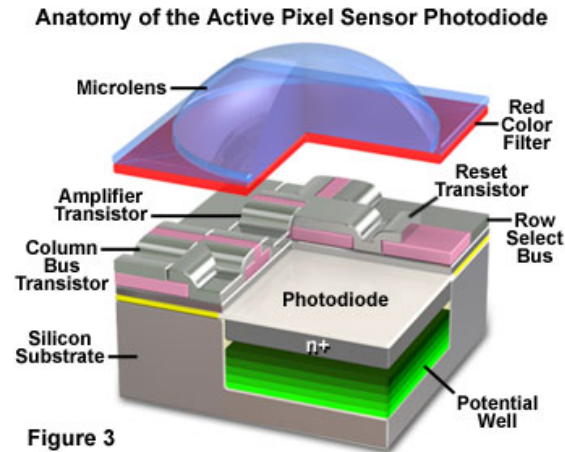


Figura 1.1: Esquema físico de un APS[8]

Las altas escalas de integración de circuitos alcanzadas en la actualidad posibilitan el diseño de sistemas sensoriales cada vez más complejos, en los cuales se logra agrupar miles de sensores en áreas reducidas, obteniendo medidas simultáneas y flujos crecientes de datos. Este trabajo se centrará en la transmisión de datos provenientes de sensores de imagen, uno de los desarrollos que se encuentra en boga.

Una imagen, desde un punto de vista digital, es un arreglo bidimensional de números, los cuales pueden ser exhibidos en una pantalla en forma de intensidad y colores de luz. Cada punto del arreglo que se muestra en pantalla se denomina pixel, acrónimo del inglés *PIcture ELement*, o elemento de imagen. Por esto, un sensor de imagen puede estar compuesto, bien por un arreglo bidimensional de sensores lumínicos (cómo la cámara de un teléfono celular), como por un transductor que es simultáneamente desplazado y medido, (método utilizado, entre otras, para la microscopía de fuerza atómica [7]), o por una combinación de ambos métodos. Por ejemplo, un scanner posee un arreglo lineal de transductores que son desplazados a través de la hoja para generar una imagen digital. En cualquiera de los casos, es de suma utilidad que la lectura de imágenes sea realizada en el menor tiempo posible, ya que cada imagen conlleva una cantidad no menor de datos.

Uno de los trabajos que más aportó al desarrollo de sensores de imágenes modernos, fue la introducción de los APS (*Active Pixel Sensor*, o sensor de pixeles activos) [9]. Este sensor integra en un proceso CMOS (acrónimo inglés de Metal-Óxido-Semiconductor Complementario, que es el método actualmente más económico para integrar transistores en una única pastilla de silicio), un fotodiodo, un transistor de reset (utilizado para controlar el tiempo de integración, es decir, de exposición a la luz) transistores de selección (utilizados para conectar un pixel determinado dentro del arreglo) y un amplificador seguidor de fuente en cada pixel[8]. El fotodiodo, previamente cargado, transduce la luz en una descarga eléctrica y el amplificador convierte la carga remanente en tensión para facilitar su lectura. La Figura 1.1 muestra un dibujo de un pixel del tipo APS. Se observa el fotodiodo y los diferentes transistores que intervienen en el funcionamiento del APS. Además se incorpora una microlente cuya función es la de enfocar los fotones sobre el área sensible y un filtro utilizado para identificar los diferentes colores. En el

caso de sensores monocromáticos, se omite la colocación del filtro de color durante la fabricación.

A partir del desarrollo de los APS, se fue perfeccionando el método hasta obtener circuitos integrados con mayor cantidad de píxeles y que pueden tener diversas aplicaciones. Por ejemplo, en los trabajos [10] y [11] se presentan sensores CMOS basados en la arquitectura MIMOSA (de *Minimum Ionizing particle MOS Active pixel Sensor*). Estos sensores se desarrollaron con el objetivo específico de detección de radiación ionizante.

También existen desarrollos de sensores de radiación a través de APS comerciales. Perez *et al.* identificaron eventos producidos por partículas alfa en campos de radiación mixtos mediante el procesamiento de imágenes adquiridas con sensores comerciales CMOS[12] y desarrollaron detectores de neutrones térmicos con sensores APS cubiertos con una capa de Gd_2O_3 [13]. Galimberti *et al.* utilizaron un sensor de imágenes comercial para realizar un detector de gas Rn en el ambiente[14]. En otro trabajo, Hizawa, *et al.* fabricaron un sensor que adquiere imágenes midiendo el pH con cada uno de los píxeles[15], pudiendo observar de fenómenos químicos en tiempo real.

Como se mencionó antes, una imagen digital es un arreglo de datos. Esto quiere decir que un sensor de imágenes con n píxeles de largo y m de ancho, captura $n \times m$ datos en cada lectura. A su vez, para digitalizar valores, un circuito debe poseer, al menos, un conversor analógico-digital (ADC) de x cantidad de bits, lo que implica que cada dato estará compuesto por x dígitos binarios, es decir, un volumen importante de datos por cada lectura. Como ejemplo, un sensor comercial VGA, en su configuración más básica, posee 640 líneas horizontales y 480 verticales, con una resolución de 8 bits por cada pixel, lo que otorga 2.457.600 bits por cada lectura del sensor.[16] Si además se incorpora la cantidad de imágenes que se toman en función del tiempo (cuadros por segundo o fps), nos otorga un flujo de datos para nada despreciable.

Desde el punto de vista de la electrónica digital, para poder adquirir y transmitir grandes volúmenes de datos, se requiere de circuitos que sean capaces de operar a altas frecuencias de conmutación. El diseño de dichos circuitos no es trivial, ya que cuando las longitudes de onda de las señales presentes son comparables con las dimensiones físicas de dichos circuitos, debe considerarse el uso de líneas de transmisión[17]. Esto implica que no se puede diseñar utilizando un criterio de uniformidad en los parámetros y exige un análisis mas detallado y preciso.

Otro problema que presentan los circuitos electrónicos digitales tiene que ver con los tiempos de propagación de las corrientes y tensiones que circulan a través de ellos. Cuando se aplica un impulso en un conductor, debido a las capacidades propias de los materiales utilizados, las tensiones pueden demorar unos instantes en establecerse. Puede suceder que varias señales lleguen a los puertos de un dispositivo por conductores con distintas longitudes y generen retardos diferentes. Esto puede ocasionar un comportamiento indeseado si no se toman los recaudos adecuados.

Aún suponiendo un perfecto diseño, los circuitos digitales de alta velocidad se encuentran limitados en la frecuencia de conmutación por la temperatura que se necesita disipar. La potencia consumida por estos dispositivos es proporcional a la frecuencia de funcionamiento[18]. Parte de esta potencia se transforma en calor y produce un aumento en la temperatura. Si el incremento

es indiscriminado, puede destruir los circuitos.

Una posible solución para disminuir la frecuencia de las señales sin perjudicar la tasa de transferencia es la incorporación de varios conductores para enviar datos en paralelo. La cantidad de conductores a través de los cuales circula la información, se denomina ancho de bus. Idealmente, para lograr una tasa de transferencia determinada, se podría disminuir la frecuencia tantas veces como conductores se agreguen. Por ejemplo, transmitiendo por cuatro filamentos, se podría enviar la misma información a un cuarto de la frecuencia que se necesitaría con uno solo de iguales características.

Existen distintas tecnologías para efectuar la lectura de los datos generados por los sensores y su posterior transmisión. La incorporación y evolución de microcontroladores permite capturar y procesar volúmenes crecientes de datos. Sin embargo, este tipo de dispositivos posee una estructura rígida: su capacidad de procesamiento se encuentra limitada a una instrucción por ciclo de reloj y a un ancho de bus definido. Para aumentar los volúmenes de datos que circulan a través de ellos, no es posible aumentar el ancho de bus, sino que se torna necesario incrementar la frecuencia de funcionamiento, generando los problemas anteriormente detallados.

Una solución óptima, sin considerar los costos asociados a esto, sería el desarrollo de un circuito integrado de aplicación específica (ASIC del inglés *Application Specific Integrated Circuit*). En este tipo de circuitos, el diseñador elabora un circuito que puede operar a altas velocidades y, a su vez, obtener un ancho de bus sin restricciones, más que las dimensiones físicas del área donde será realizado el circuito. Sin embargo, cuando sí se considera el costo asociado a este enfoque, se vuelve una solución ineficiente en bajas cantidades. La manufactura de este tipo de dispositivos puede tener un costo de miles hasta cientos de miles de dólares, dependiendo del proceso de fabricación utilizado. Gran parte de estos costos son no recurrentes, es decir, solo se pagan una vez por proyecto. En grandes cantidades de dispositivos, este tipo de soluciones se vuelven más convenientes.

Otro enfoque, es la utilización de Arreglos de Compuertas Programables por Campo (FPGA, acrónimo del inglés *Field-Programmable Gate Array*). Un FPGA es un dispositivo electrónico que posee la capacidad de sintetizar casi cualquier circuito digital. En esencia, es una matriz de bloques lógicos (también llamadas *slices* o celdas lógicas, dependiendo del fabricante), que contienen Tablas de Verdad (LUTs o *Look-Up-Table*) y flip-flops (ff), entre otras cosas, y pueden ser interconectadas entre sí, según el criterio del usuario. Así, permite implementar una solución digital en un circuito físico, a diferencia de los microcontroladores, lo realiza a través de un algoritmo almacenado en una memoria, incorporando la ventaja de definir el ancho de bus necesario para relevar una gran cantidad de datos y transmitirlos a frecuencias de trabajo menores, además de ejecutar tareas en paralelo, disminuyendo los tiempos de procesamiento. A su vez, al ser implementado en un área muy pequeña, debido a la integración del sistema, este tipo de sistemas puede trabajar a frecuencias muy elevadas, lo que implica una mayor tasa de datos aún. A pesar de la gran diversidad de precios existentes en el mercado, una FPGA de costos menores a la centena de dólares suele tener muy buenas prestaciones para la mayor parte de las aplicaciones.

Existen diversas publicaciones en donde se observa el uso de FPGAs para la implementación de sistemas que producen imágenes. Por ejemplo, el desarrollo de un detector de radiación

ionizante utilizando un sensor de imagen CMOS comercial. Para ello, los autores utilizaron una FPGA para configurar diversos parámetros del sensor con el fin de generar estrategias para la identificación de partículas alfa en campos de radiación mixtos y transmitir imágenes a una computadora personal (PC) a través de un puerto UART[19]. Se denomina ultrasonografía a la técnica de adquirir imágenes basándose en reflexiones de ultrasonido. Sus aplicaciones son múltiples, en las que se destaca el diagnóstico médico debido. Un trabajo reciente desarrolló un sistema que mejora la obtención de ecografías médicas con bajo costo utilizando una FPGA[20]. El autor presentó un algoritmo para la supresión de ruido de impulso en tiempo real para imágenes codificadas como JPEG 2000 realizado y probado en Matlab e implementado en una FPGA. Yanagisawa *et al*, desarrollaron un sistema con telescopios pequeños para explorar objetos de campo cercano con la finalidad de monitorear cuerpos celestes que puedan colisionar con el planeta[21]. En este trabajo, se aprovechó la velocidad de los circuitos implementados en FPGA para minimizar el tiempo de adquisición.

El desarrollo de nuevos sensores brinda a los investigadores un gran volumen de datos. En muchos casos, la obtención de datos por si misma no otorga información, sino que es necesario procesar y analizar los mismos. La invención y evolución de las computadoras, como así también el desarrollo de nuevos algoritmos, dan lugar a procesamiento de datos cada vez más complejos en tiempos mucho menores. Las primeras ENIAC, computadoras de propósito general desarrollada en el año 1946 para el cálculo de tablas balísticas de las fuerzas armadas estadounidenses, podía ejecutar 20 operaciones cada 10 μ s [22], es decir, ejecutaba instrucciones con una frecuencia máxima de 200 kHz. A su vez, tuvo un costo aproximado de U\$S 500.000, pesaba 5 t y consumía 175 kW. En contraste con aquello, es posible conseguir en el mercado actual, computadoras con tamaño y peso reducido, que ejecutan instrucciones en cuestión de nanosegundos, (5 ordenes de magnitud menos), consumen menos de 1 kW y cuestan algunos cientos de U\$S. A tal punto ha evolucionado esta tecnología, que se cuenta con computadoras muy potentes en casi cualquier laboratorio, oficina u hogar. La capacidad de cálculo que exhiben estos dispositivos, sumada al desarrollo de nuevos métodos y algoritmos de cálculo, permite a los investigadores procesar datos en tiempo reducido, facilitando el análisis y la generación de nueva información.

En todos los casos que se consideran en este trabajo, la generación de datos y el procesamiento de lo mismos se da en sistemas diferentes. Es decir, los datos son relevados por los sensores y adquiridos luego por los FPGAs. Finalmente llegan a una PC para su posterior procesamiento y análisis. Se requiere, por tanto, de una conexión a través de la cual los datos puedan ser transferidos del sistema de adquisición, la FPGA, a la PC y viceversa. Se torna de suma utilidad, entonces, proveer una comunicación efectiva y robusta que permita transmitir grandes volúmenes de datos en poco tiempo, y de esta forma facilitar los tiempos de desarrollo, pruebas, depuración, procesamiento y análisis.

La implementación de un sistema de comunicación en una FPGA puede ser resuelta de muchas maneras, quedando a criterio del desarrollador utilizar algún protocolo estándar, o bien diseñar uno propio. Sin embargo, en una computadora, las formas de comunicar datos se vuelven un poco más restrictivas y acotadas a los puertos y señales que puede manejar el equipo, conforme el fabricante haya establecido. Este trabajo busca implementar una comunicación entre una computadora personal y una FPGA, utilizando un protocolo estándar, que esté disponible

en cualquier computadora comercial y que posea una tasa de bit suficiente para poder transmitir imágenes.

1.2. Protocolos disponibles para la transmisión de datos entre PC y FPGA

Pero, ¿Cuántos datos son suficientes para el propósito de transmitir imágenes? Se toma como base de diseño el sensor que utiliza Pérez en su Tesis de Maestría [23], una cámara para adquirir imágenes monocromáticas de código MT9M001C12STM, comercializado por Actina Imaging [24]. Este sensor posee 1480x1024 pixeles, con profundidad de 10 bits y puede operar hasta a 30 cuadros por segundo. Todo esto, otorga la necesidad de una tasa aproximada de $393.2 \text{ Mbit s}^{-1}$.

Esta tasa de bits es más que suficiente. Si la comparamos, por ejemplo con las señales de Televisión Digital. El estándar más exigente de la norma americana de la SCTE (Sociedad de Ingenieros de Comunicación por Cable), posee una tasa de 38.8 Mbit s^{-1} [25].

Además, pensando en que la implementación sea compatible con equipos informáticos convencionales, es decir, se encuentren fácilmente en el mercado y no posean especificaciones que escapen al uso de oficina. Esto se cumple hoy en día con tres tipos de puertos: Ethernet, dedicado principalmente a conexión de redes mediante cables; Wi-Fi, utilizado para el accesos a la red de forma inalámbrica; y USB, dirigido a la comunicación de periféricos con la PC.

Al hablar de Ethernet o Wi-Fi, se hace referencia a dos formas diferentes de conectarse a una red de computadoras. En otras palabras, se habla de dos o más nodos, compuestos por PCs o cualquier dispositivo electrónico con capacidad de realizar cálculo binario, que pueden intercambiar datos a través de una trama bastante compleja de componentes diferentes. Ambos protocolos hacen referencia solo a la conexión física de los dispositivos y el control de acceso de cada uno de ellos a la conexión. Quedando a cargo de otros sistemas, con sus protocolos, que los datos enviados puedan ser correctamente recibidos por el usuario de la PC. La gran diferencia entre ellos radica en el medio físico que utilizan: Wi-Fi emplea ondas electromagnéticas emitidas mediante radiofrecuencia, mientras que en Ethernet, estas ondas son acarreadas por uno o más conductores, como ser cable coaxial, cables de par trenzado o fibra óptica.

Ethernet, también conocido como IEEE 802.3, es una norma que define cómo se deben conectar nodos a través de conductores para conformar redes de área local (LAN o *Local Area Network*), es decir, redes pequeñas, como ser domésticas, de oficinas o de pequeñas empresas, de forma que puedan transmitir información a velocidades seleccionables entre 1 Mbit/s y 400 Gbit/s [26]. Utiliza una tecnología denominada Acceso Múltiple Sensando la Portadora con Detección de Colisiones (CSMA/CD del inglés *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*). Esta tecnología se caracteriza por la escucha activa de todos los dispositivos conectados a la red. Solo cuando la dirección del paquete de información que viaja corresponde al dispositivo, este realiza una función. A la hora de transmitir, corrobora que no exista una señal portadora y, si ésta está presente, espera para retransmitir.

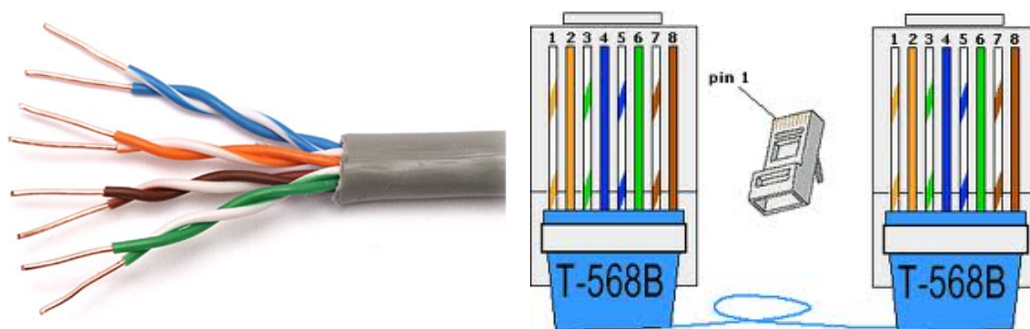
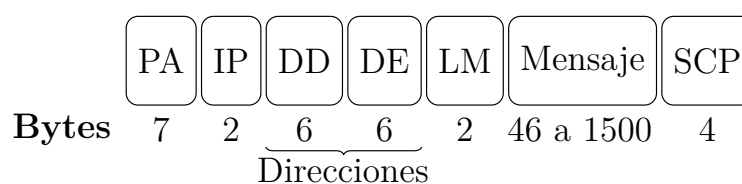


Figura 1.2: Par Trenzado y un dibujo de su ficha de conexión.



Referencias

PA:Preámbulo

IP: Inicio de Paquete

DD: Dirección de Destino

DE: Direcció de Emisión

LM: Longitud del Mensaje

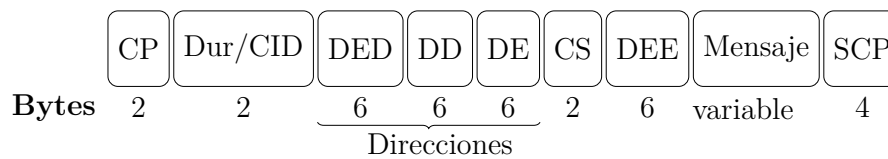
SCP: Secuencia de chequeo del paquete

Figura 1.3: Estructura de un paquete Ethernet

Dependiendo de la frecuencia de la portadora y la tasa de transferencia a la que transporta el mensaje, la norma especifica el conector y la distancia máxima a la que debe conectarse una repetidora, es decir, un dispositivos que reciba, reconstruya y emita la señal recibida. Estos conectores pueden ser cable coaxial, fibra optica o cable de par trenzado. Este último es el más usual en las PCs comerciales y se muestra, junto a su ficha característica en la Figura 1.2.

La información se estructura en paquetes para permitir la comunicación entre muchos nodos de la red. Un paquete, como se observa en la Figura 1.3, se compone de un preámbulo con 7B que sirve para sincronizar los dispositivos en cada extremo de la conexión, 1 B de inicio, 12 B de direcciones, que corresponden 6 al nodo destinatario y 6 al emisor respectivamente, 2 B que indican la longitud del mensaje, entre 46 y 1500 B de datos y 4 B para la verificación de la transmisión. Otra definición importante de la norma, son las características eléctricas de las señales, pero no se detallan en este trabajo porque varían en función de la velocidad del puerto.

Por su parte Wi-Fi, perteneciente a la asociación de compañías denominada Wi-Fi Alliance, se rige por la norma que estableció esta última. Existe una norma equivalente, encuadrada en la especificación IEEE 802.11, referida a las redes de area local inalámbrica, o WLAN (siglas del ingles *Wireless Local Area Network*). Wi-Fi se enfoca en las que se refieren a las

**Referencias****CP:** Control de Paquete**Dur/CID:** Duración del paquete/Identificación de conexión**DED*:** Dirección de Enrutador de Destino**DD*:** Dirección de Destino**DE:** Dirección de Emisión**CS*:** Control de Secuencia**DEE*:** Dirección de Enrutador de Emisión**SCP:** Secuencia de chequeo del paquete

*Pueden no estar dependiendo del tipo de mensaje

Figura 1.4: Estructura de un paquete Wi-Fi

comunicaciones de radiofrecuencia con portadora de 2.4 GHz, que se incorporan en las revisiones b, g y n de la norma IEEE. IEEE 802.11 está pensado especialmente para dispositivos portátiles y móviles, que según la norma, los primeros, si bien pueden ser trasladados con facilidad, operan estáticos y los segundos trabajan en movimiento [27]. La principal característica que posee este tipo de comunicación es la falta de conductores para la elaboración de la red, sin contar las conexiones entre los transceptores que emiten y reciben las señales de radiofrecuencias y los nodos, en donde la información es producida y/o consumida. En cuanto al formato del paquete de datos, el cuál se muestra en la Figura 1.4, es bastante similar al de Ethernet. En primer lugar, se envían dos bytes de control que indican el tipo de paquete a enviar. Luego siguen dos bytes que, dependiendo de la etapa de la comunicación puede indicar la duración del mensaje a transmitir o un identificador de una conexión establecida previamente. Siguen entre 6 y 18 bytes de direcciones del enrutador que recibe los datos, el nodo emisor y el destinatario. Continúan, dos bytes de control de secuencia se utilizan para fragmentar transmisiones largas. Continúa un campo más para dirección que corresponde a la red emisora de 6 bytes. Todos los campos de dirección pueden variar en función del tipo de mensaje que se envía. Los últimos dos campos de la trama corresponden a la información que se quiere comunicar (hasta 2312 bytes) y un código de chequeo por redundancia cíclica de 32 bits (4 bytes).

Existen múltiples ventajas de utilizar radiofrecuencias para conectarse a la red, tales como la libertad de mover el punto de trabajo y la economía a la hora de armar redes con muchos nodos. Sin embargo, posee algunas desventajas notorias, propias del medio de propagación, que lo hacen no tan óptimo para los fines del presente trabajo. Las redes inalámbricas tiene la característica de que no es del todo confiable: posee múltiples fuentes de interferencia, ya que varias tecnologías que utilizan la misma frecuencia (Bluetooth, Zig-Bee, WUSB, microondas). Esto hace que la señal por momentos presente cierta interferencia. A su vez, suele presentar variaciones temporales y asimetrías en las propiedades de propagación, lo que puede provocar interrupciones en la comunicación.

Ambos protocolos proporcionan una solución de conexión de redes de nivel físico y ejecutan

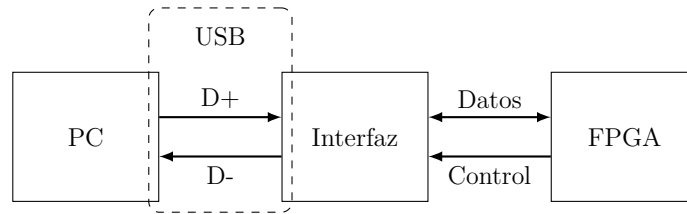


Figura 1.5: Esquema propuesto para implementar la comunicación

tareas de control de acceso al medio (MAC) a fin de evitar colisión en los datos, es decir, que dos dispositivos transmitan en forma simultánea e interfieran la comunicación. Sin embargo, para establecer una red, faltan componentes físicos y lógicos tales como un sistema de control enlace lógico (Logic Link Control), un sistema de direccionamiento, como el Protocolo de Internet (IP), una capa de transporte de datos, (como el protocolo TCP) y las capas de software que permiten acceder a los protocolos anteriormente mencionados.

A pesar de lo anterior, es posible establecer comunicaciones punto a punto con ambos protocolos, simplificando mucho el sistema de transmisión de datos. Sin embargo esta solución presenta un inconveniente no menor: se le quita a la PC un acceso a la red, que en la mayoría de los casos es el único. Esto no es deseable ya que la conectividad es un requisito fundamental en cualquier hogar u organización, ya sea empresarial, gubernamental, científica o de cualquier tipo.

Por su parte el protocolo USB (acrónimo de *Universal Serial Bus*), es una norma desarrollada por seis de las empresas más grandes de la industria informática, pensada y desarrollada para la conexión de teléfonos y periféricos a PCs [28]. En la versión original, USB poseía conectores cableados de 4 conductores, y presenta una topología de bus, es decir todos los dispositivos conectados a una misma conexión física, que es manejada por una PC y en la cual solo transmite y recibe un dispositivo a la vez. Este tipo de conexión tuvo tal penetración en el mercado que se transformó en una norma de facto y actualmente es incorporada casi por defecto y necesaria a la hora de comprar e instalar periféricos.

USB presenta diferentes versiones de su norma, cada cual con una o más tasas de transmisión y señalización. La versión 1 posee dos revisiones, 1.0 fue lanzada al mercado en el año 1996 y 1.1 que se presentó en Agosto de 1998. La primera alcanza una tasa máxima de 1.5 Mbit s^{-1} y la segunda hasta 12 Mbit s^{-1} . USB 2.0 fue presentado en Septiembre del 2000 y es capaz de transmitir a 480 Mbit s^{-1} . La tercera versión, USB 3.0, fue lanzada al mercado en 2011 y transmite 5 Gbit s^{-1} . Esta última versión fue revisada en julio de 2013 y en septiembre de 2017, ofreciendo la primera de ella 10 Gbit s^{-1} y 20 Gbit s^{-1} la segunda. Resulta suficiente para el propósito del siguiente trabajo, la implementación de una comunicación USB 2.0, con tasa de transferencia de 480 Mbit s^{-1} . En el Capítulo 2 se profundizarán en conceptos específicos de la norma USB.

El alumno sabe que es posible implementar una comunicación USB completa a través de una FPGA. Sin embargo, esto sería muy costoso en términos de tiempos de desarrollo y de recursos de FPGA disponibles para la implementación de otros sistemas, los cuales son el objetivo de la

comunicación.

Se plantea, entonces, un esquema como el que se observa en la Figura 1.5 en la cual se utiliza una interfaz externa al FPGA. La comunicación USB propiamente dicha será efectuada entre la interfaz y la PC, mientras que se plantea una comunicación diferente entre la interfaz y el FPGA. Este último, por su parte, tendrá la tarea de realizar el control de esta comunicación.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Principal

El objetivo del presente trabajo es obtener una comunicación USB 2.0 de alta velocidad entre una PC y un FPGA.

Esta comunicación debe realizarse y documentarse de forma tal que pueda ser usado posteriormente en aplicaciones científicas desarrolladas con FPGA's.

1.3.2. Objetivos Particulares

Para la consecución del objetivo general, se deben cumplir los siguientes objetivos particulares:

- Comprender el funcionamiento del protocolo USB.
- Seleccionar los componentes a utilizar.
- Configurar los componentes seleccionados.
- Desarrollar un núcleo en VHDL que sirva de interfaz.
- Diseñar e implementar la interconexión de los componentes seleccionados.
- Verificar el sistema desarrollado.
- Desarrollar un documento que explique el modo de uso del código VHDL utilizado.

1.4. Estructura del Informe

El presente informe se divide en 2 bloques principales: uno referido al desarrollo del sistema y el siguiente a su forma de uso y verificación.

Dentro del bloque referido al desarrollo del sistema, se encuentran los primeros 5 capítulos:

1. **Introducción:** En este capítulo se intenta exponer lo que motiva el presente trabajo, la propuesta que da solución a la motivación, el objetivo y alcance que el trabajo busca y la estructura del mismo. Se brindan, además, conceptos importantes de la norma USB que son significativos para los objetivos de este trabajo.

2. **??:** Se describe aquí todas las herramientas de las que se vale este trabajo para cumplir con os objetivos propuestos.
3. **??:** Se presenta la arquitectura, configuración y código desarrollado para el presente trabajo, como así también las herramientas específicas provistas por el fabricante, que facilitan el desarrollo.
4. **??:** Este capítulo detalla lo desarrollado para implementar la comunicación entre la FPGA y la interfaz. Se expone una maquina de estados descrita en VHDL y sintetizada en FPGA. También se describe un circuito impreso realizado para conectar ambas partes.
5. **??:** Se desarrolla las tareas desarrolladas a fin de realizar las depuraciones del sistema y la verificación del cumplimiento de las especificaciones.

1.5. Sumario del capítulo

En el presente capítulo se expuso la necesidad de la elaboración de un sistema de comunicación que permita la transferencia de datos entre una PC y un FPGA para ser utilizados por sistemas implementados con este último dispositivo. Se planteó una solución utilizando una interfaz comercial que sirve de intermediario entre estas herramientas y se brindó una justificación del empleo del protocolo USB 2.0 de alta velocidad como la implementación óptima del sistema. Se presentó también la estructura del presente informe y se dieron algunos detalles relevantes para este trabajo de la norma USB.

Capítulo 2

Bus Serial Universal 2.0

El Bus Serial Universal, o USB por sus siglas en inglés, es un sistema de comunicación diseñado durante los años 90 por seis fabricantes vinculados a la industria informática, Compaq, Intel, Microsoft, Hewlett-Packard, Lucent, NEC y Philips, con la idea de proveer a su negocio de un sistema que permita la conexión de PCs con teléfonos y periféricos con un formato estándar, fácil de usar y que permita la compatibilidad entre los distintos fabricantes.

Hasta ese momento, el gran ecosistema de periféricos, sumado a los nuevos avances y desarrollos, hacía muy compleja la interoperatividad de todos ellos. Cada uno de los fabricantes desarrollaba componentes con fichas, niveles de tensión, velocidades, drivers y un sinnúmero de etc diferentes, lo cuál dificultaba al usuario estar al día y poder utilizar cada componente que compraba. Lo más probable era encontrar que, cuando se comparaba una PC, se debía cambiar el teclado, el mouse y/o algún periférico específico. Esto también complicaba a las mismas empresas productoras, por que la introducción de un nuevo sistema requería de mucho soporte extra para poder conectar todo lo ya existente.

Todo esto, quedó saldado con el aparición de la norma USB, que debido a la gran cuota de mercado de sus desarrolladores, fue adoptado en forma rápida y se transformó en la especificación por defecto a la hora de seleccionar un protocolo. Al punto tal esto se cumplió que hoy, más de 20 años después, es muy difícil encontrar PC's con otro tipo de puertos, salvo que, en el momento de su compra, se solicite especialmente un puerto determinado. Así, cualquier PC nueva disponible en el mercado debe poseer puertos USB para la conexión de los periféricos.

El presente capítulo intenta ser un breve resumen con los aspectos más relevantes de la norma en cuanto a su composición física, su topología, los dispositivos que intervienen, la importancia de los mismos y como los datos son transmitidos desde y hacia una PC.

2.1. Objetivos y metas de la norma USB 2.0

El diseño de la norma USB busca resolver tres problemáticas interrelacionadas, que son: La conexión de teléfonos con las PC, la facilidad de uso, es decir, que el usuario solo conecte su dispositivo y pueda utilizarlo, y la expansión de puertos disponibles para conectar periféricos.

[28]

Para satisfacer estas tres demandas, la norma USB 2.0 busca alcanzar un conjunto de metas:

- Expandir los puertos de PC destinados a periféricos y que posean facilidad de uso.
- Brindar una solución de bajo costo que permita tasas de transferencias de hasta 480 Mbps.
- Ser totalmente compatible con datos de voz, audio y video en tiempo real, es decir, que pueda transmitir una conversación o video-llamada sin intermitencias.
- Poseer un protocolo flexible en el que convivan transferencias isocrónicas y mensajes asincrónicos.
- Integrar la norma en las tecnologías de dispositivos básicos.
- Comprender diferentes configuraciones de Pc y factores de forma.
- Proveer una interfaz estandar capaz de difundir rápidamente en los productos existentes en el mercado.
- Habilitar nuevas clases de dispositivos que aumenten las posibilidades de las PCs.
- Compatibilizar completamente con los dispositivos fabricados con versiones anteriores de la misma especificación.

2.2. Descripción general de un sistema USB

USB posee un esquema de bus maestro-esclavo, en forma de árbol cuyo nodo principal es el host. Es decir, la comunicación se realiza siempre a través de una sola línea de comunicación a la que se conectan todos los dispositivos que se necesite (dada el campo de direcciones provisto por la norma, 128 dispositivos como máximo). De esta manera, solo puede transmitir un dispositivo a la vez.

El acceso al bus, es decir, el acceso a la línea única compartida de comunicación, es administrado por un maestro. El maestro se encarga de solicitar a cada uno de los dispositivos su intervención. Posteriormente, el dispositivo debe responder al pedido del maestro. Este esquema es lo que se conoce como maestro-esclavo.

En un sistema USB no cualquier dispositivo puede ser maestro. Este rol lo cumple solo uno: una PC, o cualquier dispositivo con capacidad de llevar a cabo las tareas asignadas (que se detallan más adelante); denominado Host por la norma. La palabra *HOST* proviene del habla inglesa y se traduce como anfitrión, aunque en la jerga se conoce comunmente por su nombre en inglés.

La topología del bus, cómo se observa en la Figura 2.1, posee forma de árbol, es decir, puede ser pensada como una comunicación vertical, donde en el punto más alto se encuentra el Host. Siguiendo hacia abajo, el bus puede encontrar dos tipos diferentes de dispositivos: Funciones,

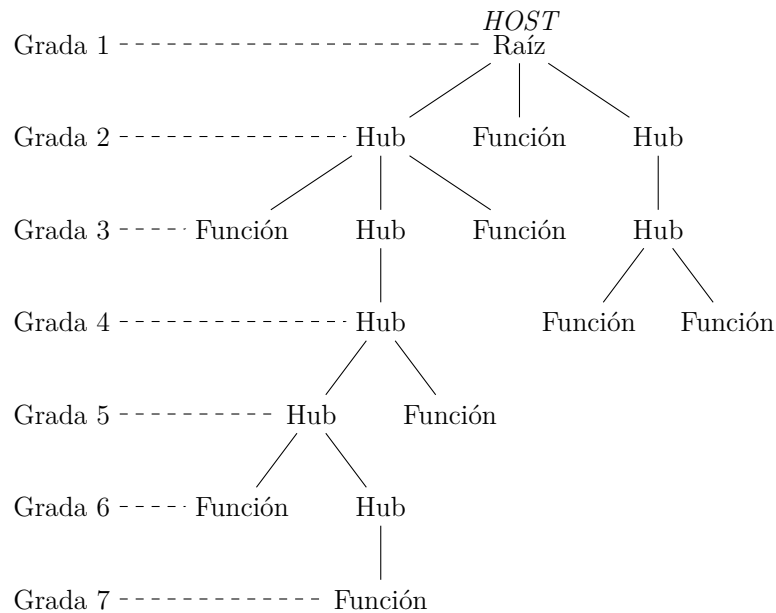


Figura 2.1: Topología de un sistema USB

cuyo rol es el de proveer una utilidad al sistema, como ser la de captura de imagen, reproducción de audio o el ingreso de comandos; y Hubs (concentradores o distribuidores), que se encargan de conectar una o más funciones al sistema. La norma USB establece gradas, en donde cada Hub introduce una nueva grada que contiene a las Funciones conectadas. Por cuestiones de restricciones temporales y tiempos de propagación en los cables, no se permiten más de 7 gradas, incluyendo al Host en la primera. Es decir, no se puede conectar más de 5 Hubs en cascada. La grada 7 sólo puede contener Funciones[28].

Cada uno de estos dispositivos diferentes, se interconectan entre sí a través de cables y conductores específicos, diseñados en forma tal que no sea posible conectarlos en forma equivocada. Para cumplir con la norma, el Host debe tener siempre un zócalo compatible con conectores tipo A y los periféricos para enchufes de tipo B. Se observan las diferencias entre uno y otro en la Figura 2.2. Los cables de conexión poseen dos pares de conductores: uno para la señal de

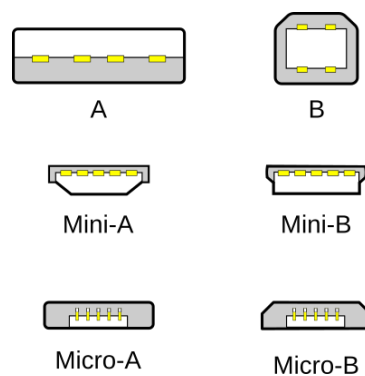


Figura 2.2: Tipos de conectores USB. Los tipo A deben ser usados en el extremo del Host y los tipo B hacia los periféricos[29]

alimentación de 5 V (V_{BUS} y GND) y otro para el flujo de datos ($D+$ y $D-$).

A nivel eléctrico, la interconexión de datos en los dispositivos se lleva a cabo a través de una codificación de inversión sin retorno a cero, es decir, el cambio de nivel de tensión representa un '0' y el no cambio representa un '1'. Además, la señal de datos es diferencial. Esto implica que cuando $D+$ es positivo, $D-$ debe ser negativo y viceversa.

Cabe destacar que, al tener una señal diferencial, la norma USB es half-duplex, es decir, puede transmitir en los dos sentidos (de host a funciones y al contrario), pero no puede hacerlo en simultáneo[30], sino que primero debe transmitir un dispositivo y, al finalizar este, el otro es el que tiene acceso al bus.

La velocidad del cambio de variables puede darse a diferentes valores, dando lugar a tres tipos de tasa de bit: Alta-velocidad implica una tasa de bit de 480 Mbit s^{-1} , Velocidad-completa posee una tasa de bit de 12 Mbit s^{-1} y baja-velocidad transmite a una tasa de bit de 1.5 Mbit s^{-1} .

Cuando el host se comunica con las diferentes funciones, lo realiza a través de paquetes. Los paquetes implican que la información que se transmite a través del bus está encapsulada en un formato establecido. Cada vez que un dispositivo accede al bus, lo debe hacer de una manera particular definido por el tipo de transferencia, por su rol (host, hub o función) y por el estado de la transmisión dentro del protocolo establecido.

2.3. Dispositivos que componen un sistema USB

Dentro de un sistema USB existen tres tipos diferentes de dispositivos: el host, los hubs y las funciones. Cada uno de ellos tiene asignado un rol específico dentro de la comunicación. Se detallan a continuación las tareas pertinentes a cada uno de ellos.

2.3.1. Host USB

El host es quien comanda las comunicaciones. Este dispositivo debe tener la capacidad de memoria y de procesamiento necesario para almacenar y ejecutar el software de control. A su vez, debe tener un hardware necesario que le permita hacer un monitoreo y control de los eventos que suceden en el bus.

Entre las tareas que debe llevar a cabo, se encuentran:

- Detectar la conexión y desconexión de dispositivos.
- Administrar el flujo de los comandos de control con los diferentes dispositivos.
- Administrar el flujo de la información entre él (el Host) y los diferentes dispositivos.
- Registrar la estadística de la actividad y el estado del bus.

- Proveer potencia a los dispositivos conectados, cuando estos así lo requieran.

Debido a que las funciones del host necesitan una cantidad mínima de recursos de almacenamiento y procesamiento, lo más normal es que el dispositivo que cumpla esta función sea una PC, o posea algún sistema de cómputo incorporado.

El host es quien inicia, siempre, la comunicación con las funciones. Las funciones, a su vez, responden a lo que fue solicitado por el host, cuando él lo indique.

2.3.2. Hubs USB

Un hub USB tiene la función de proveer puertos al bus. El primer hub esta incorporado en el host y camino abajo, cada vez que se requieran más puertos a los cuales incorporar periféricos, se pueden ir agregando más hubs.

Una función importante llevada a cabo por un hub, para la norma USB, es la de servir como interfaz entre dispositivos con diferentes velocidades, optimizando así el ancho de banda disponible para la comunicación.

2.3.3. Funciones USB

La norma nombra como función a todo aquel dispositivo que se conectan al bus y brinda al host la capacidad de realizar una nueva tarea. Por ejemplo, un teclado otorga un método de entrada adicional, un mouse permite manejar un puntero de la interfaz gráfica, un parlante posibilita la emisión sonidos y un micrófono su ingreso. Cada una de estas utilidades, componen una función USB.

A su vez, un dispositivo que brinda más de una utilidad es visto por el host como funciones separadas conectadas a un hub. Por ejemplo, si se pensamos en unos auriculares con micrófono, como los usados por una operadora en un centro de llamados, aunque se presenten integrados en un mismo producto y tengan un único puerto de conexión al bus, el host los toma como dos funciones separadas.

Las funciones, desde un punto de vista de software, son independientes unas de otras, por lo que cuando un programa, llamado cliente, necesita utilizar una de ellas, puede acceder a ésta directamente sin conocer cuantas y cuales funciones diferentes existen en el bus.

Extremos

Cada función está compuesta de un conjunto de extremos. Un extremo es una porción de dispositivo identificable en forma unívoca[28]. Cada extremo tiene características definidas en tiempo de diseño y deben estar adecuados a los requerimientos de cada dispositivo. Los extremos tienen un solo sentido de comunicación y un tamaño máximo de mensaje a transmitir o recibir.

En el tiempo de conexión del dispositivo al bus, este debe enviar una descripción en donde consten sus extremos y las diferentes formas de configuración de cada uno, con el tipo de mensajes que soporta, el sentido de la comunicación, el tamaño, entre otros parámetros. Esta descripción se lleva a cabo través de lo que la norma llama descriptores.

Todo dispositivo debe contener un extremo con dirección cero dedicado exclusivamente al control de la función por parte del host. Debe, como mínimo, poder comunicarse a velocidad completa, es decir, con una señal de 12 Mbits s^{-1} y, a su vez, responder a los comandos de control básicos cómo adquirir la dirección, recibir la configuración y enviar los descriptores del dispositivo y sus diferentes configuraciones.

Dependiendo de las diferentes requerimientos, la Función USB puede contener más extremos (15 de entrada y 15 de salida como máximo). Cada extremo no-cero está podrá tener diferente latencia y/o acceso al bus, ancho de banda, manejo de errores, tamaño máximo de paquete soportado y dirección. Todo esto, se resume en los diferentes tipos de transferencias.

2.4. Paquetes USB

Cada vez que un dispositivo transmite información a través del bus, lo hace con un formato particular, establecido por el protocolo que dicta la norma USB. Cada uno de los fragmentos de información que envía un dispositivo, se llama paquete.

Un paquete está compuesto por diferentes campos. El sistema reconoce cada campo, decodifica su información e identifica cada paquete, con su emisor, el tipo de datos que envía, el sentido de circulación de la misma y puede, a su vez, corroborar que los datos transmitidos llegaron a destino en forma satisfactoria.

No existe un número infinito de campos y todos pueden resumirse en el presente documento. Sin embargo, solo se detallan a continuación los que el autor considera más relevantes para el objetivo del presente trabajo, quedando de lado algunos comandos inherentes a los hubs que conectan dispositivos de diferentes velocidades.

2.4.1. Campos de paquetes

Identificador de paquete

El campo Identificador de paquete (PID del inglés *Packet Identifier*) le da a conocer a los distintos dispositivos el tipo de información que va a contener el paquete. Por ejemplo, indica si el host está solicitando envío o recibo de datos, si está por enviar algún tipo de comunicación o si un dispositivo está transmitiendo los datos.

Se compone de un campo de 8 bits, de los cuales 4 corresponden al identificador propiamente dicho y los otros cuatro es el complemento a uno de los mismos datos, permitiendo corroborar

que no hubo pérdida de datos.

Existen 4 tipos de PID: Token, que antecede a cualquier transmisión y es emitido por el host; Data, indica paquetes que contienen datos transmitidos; Handshake, a través del cual los componentes del sistema se enteran si la comunicación fue efectiva o no y Special, cuya función no es de interés para este trabajo.

A su vez, dentro de los PID Token, existe 4 tipos: IN, indica que se va a realizar una envío de datos desde un extremo al host; OUT, antecede a un envío de datos en el sentido contrario, es decir del host a un extremo; SETUP, que indica que se transmite un paquete con información de control y SOF (del inglés Start of Frame) que da una señal de sincronismo y control.

Dentro de los PIDs Data, solo existen diferentes etiquetas que se usan dependiendo del tipo de transmisión. Los PIDs de Handshake contiene 4 mensajes diferentes: ACK para indicar que el mensaje fue recibido satisfactoriamente y NAK señala que no se pudo enviar o recibir, STALL significa que el extremo se detuvo y NYET de cuenta sobre demoras en la respuesta del receptor.

Dirección

El campo de Dirección señala cuál es la función que debe responder o recibir alguna directiva emitida por el host. A su vez, se divide en dos subcampos: uno que indica un dispositivo y la segunda que señala el extremo específico con el cual desea comunicarse.

Datos

Es el campo que contiene la información a transferir. Puede tener un largo de hasta 1024 bytes. Cada byte enviado se ordena con el bit menos significativo (LSb del inglés *Less Significant bit*) primero y el bit mas significativo (MSb por sus siglas en inglés) al final.

Chequeos de redundancia cíclica

El campo de chequeo de redundancia cíclica (CRC) contiene verificadores para corroborar que no hubo pérdida de información. Dependiendo de que tipo de paquete se esté transmitiendo, el CRC puede tener 5 o 16 bits. Los códigos generadores son representados por las ecuaciones 2.1 y 2.2 respectivamente:

$$G(X) = X^5 + X^2 + 1 \quad (2.1)$$

$$G(X) = X^{16} + X^{15} + X^2 + 1 \quad (2.2)$$

2.4.2. Formato de paquetes

Paquetes Token

Un paquete Token está conformado por los campos PID, Dirección y CRC-5 (CRC de 5 bits).

Paquetes SOF

Un tipo especial de paquete de tipo Token es aquel cuyo PID indica SOF. Cada paquete contiene, en lugar de la dirección, un número de 11 bits que indica el número de cuadros que han transcurrido, seguido de un código CRC-5.

Cada 1 ms el host transmite un SOF e incrementar el número de cuadro una unidad. En sistemas USB 2.0 de Alta velocidad, además, se transmiten 8 subcuadros de 125 μ s por cada cuadro. Cada uno de estos subcuadros inicia con un paquete SOF. Sin embargo, el host no actualizará el número de cuadros hasta pasado 1 ms.

Paquetes Data

El paquete de datos iniciará con un PID que indique que es un paquete de este tipo, luego enviará los datos desde el LSb hasta el MSb y, finalmente, enviará un código CRC-16 (CRC de 16 bits de longitud).

Paquetes Handshake

El paquete de Handshake solo envía un PID con información sobre si el mensaje fue recibido en forma correcta o no.

2.5. Tipos de Transferencias

Cada extremo presente en un dispositivo USB, puede estar configurado, en simultáneo, con un solo tipo de transferencias. Es importante, para el diseñador del dispositivo, entender y seleccionar el tipo de transferencia adecuada para cada uso debido a que, de ello depende las características que poseerán las comunicaciones que se efectúen.

Existen cuatro tipos de transferencias definidas por la norma USB: Transferencias de Control, transferencias en, transferencias isocrónicas y transferencias de interrupción. Cada una de ellas tiene un propósito y características diferentes, las que se detallan a continuación.

2.5.1. Transferencias de control

Las transferencias de control son utilizadas por el host para comunicaciones de configurar, emitir comandos y conocer el estado de los distintos dispositivos acoplados al bus. Se caracteriza por ser una comunicación de rafagas, es decir, de corta duración, alta prioridad y no periódica.

Habitualmente, este tipo de comunicaciones se utiliza solamente para emitir comandos hacia los dispositivos, o bien, para conocer su estado. Sin embargo, esto no quiere decir que pueda ser empleada para transmitir mensajes que no sean específicamente de comunicación.

Debido a la sensibilidad que los mensajes de control poseen para el sistema USB, estos están dotados del protocolo más estricto de chequeo, corrección y/o retransmisión de datos.

Las transferencias de control poseen dos o tres etapas en su ejecución. En la primera de ellas, el host debe enviar un Paquete Token que indique SETUP, luego envía un paquete Data con 8 B y esto es respondido por el dispositivo con un paquete Handshake indicando la recepción.

Ocasionalmente, si hiciese falta enviar más información, en una segunda etapa, el host mandará un paquete Token que indique que enviará mas información, luego mandará un paquete Data con hasta 64 B más y el extremo responderá con un paquete Handshake.

Finalmente, en la última etapa, se le permite al dispositivo informar su estado. Para ello, el host le envía un paquete Token de solicitud de datos, luego la función responderá con un paquete Data y el host le responderá con un paquete Handshake, indicándole si recibió la la información.

2.5.2. Transferencias en masa

Este tipo de transferencias son usadas para transferir paquetes grandes en forma ráfagas no periódicas. Su utilidad consiste en que permite aprovechar al máximo cualquier espacio de ancho de banda disponible.

Gracias al sistema de chequeo de errores, es posible solicitar retransmisiones, de forma de asegurar la integridad del mensaje transmitido. Esta transferencia es ideal para comunicar cantidades relativamente grandes de datos que requieren una comunicación fidedigna pero no es crítico que entregada en forma veloz, por ejemplo, una impresora. En un bus que no posee un gran uso, los mensajes alcanzarán el destino en tiempos cortos. Sin embargo, cuando exista una gran cantidad de dispositivos conectados y el ancho del bus se encuentre congestionado, un mensaje largo puede verse demorado en su entrega.

Cuando se lleva a cabo una operación de este tipo, el host envía un paquete Token hacia el bus un PID OUT cuando desea enviar datos o IN si desea recibirlos, la dirección de la función y su extremo. Luego, el emisor un paquete Data, y finalmente, el receptor de la transferencia responde con un paquete Handshake.

Una transferencia en masa (*bulk transfer*) puede poseer un tamaño máximo de 512 B de

datos por paquete transmitido.

2.5.3. Transferencias isocrónicas

Este tipo de transferencias son periódicas y continuas entre el host y los dispositivos. Son muy interesantes para información que pierde validez cuando no es entregada en un tiempo establecido.

Debido a la criticidad del tiempo en la entrega de los datos comunicados con este método, no se prevee una retransmisión de los datos enviados por este sistema.

La ejecución de una transferencia isocrónica se da cuando el host envía un paquete Token con la dirección de un extremo de este tipo de transferencias. Luego, el emisor envía un paquete Data cuyo campo de datos puede poseer hasta 1024 B y un CRC-16. Finalmente el receptor envía un paquete Handshake.

Si, dado el caso, el receptor envía un Handshake indicando que el paquete no pudo ser recibido en forma correcta, el mensaje es descartado, sin existir una retransmisión posterior del mismo paquete.

La característica sobresaliente de este tipo de transferencias tiene que ver con la asignación específica sobre el ancho de banda. por cada cuadro (1 ms), se reserva una porción de datos para un extremo que necesite comunicaciones asíncronas.

2.5.4. Transferencias de interrupción

Cuando se requiere de una comunicación con latencia asegurada pero con baja probabilidad de eventos, el tipo de transferencia óptimo para utilizar, son las transferencias de interrupción.

En este tipo de transferencias, el host consulta cada un periodo de tiempo determinado el estado del extremo que posee este tipo de transferencias. Para ello, envía un paquete Token, luego el emisor transmite un paquete Data con hasta 64 B si se trata de dispositivos de velocidad completa y 1024 B en el caso de una comunicación de alta velocidad. Finalmente, el receptor responderá con un paquete Handshake.

2.6. Descriptores

Todo dispositivo diferente al host, en tiempo de conexión al bus, debe informar sus características. Este informe, se realiza a través de un tipo especial de mensajes denominados descriptores.

Los descriptores dan cuenta al host de que clase de dispositivo se conecta, cuales son sus posibles configuraciones, que interfaces tiene cada una de ellas, las velocidades a las que puede

operar, los extremos que posee, etc.

Bibliografía

- [1] R. Pallàs-Areny and J. G. Webster, *Sensors and signal conditioning*. Wiley-Interscience, 2001.
- [2] D. M. Considine, *Encyclopedia of instrumentation and control*. McGraw-Hill, Inc., 1971.
- [3] A. Perez Garcia, “Curso de instrumentación,” p. 261, 2008.
- [4] J. Fraden, *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. New York, NY: Springer New York, 2010.
- [5] E. Slawiński and V. Mut, *Humanos y máquinas inteligentes: conocimiento educativo sobre el comportamiento interno de robots que actúan junto y para el hombre*. Saarbrücken, Alemania: Editorial Académica Española, 2011.
- [6] K. Ogata, *Modern control engineering*. Aeeizh, 2002.
- [7] G. Binnig and H. Rohrer, “Scanning tunneling microscopy,” *Surface Science*, vol. 126, pp. 236–244, mar 1983.
- [8] R. Turchetta, K. R. Spring, and M. W. Davidson, “Digital Imaging in Optical Microscopy - Introduction to CMOS Image Sensors,” (accessed in July 2019).
- [9] S. Mendis, S. Kemeny, and E. Fossum, “CMOS active pixel image sensor,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 41, pp. 452–453, mar 1994.
- [10] C. Hu-Guo, J. Baudot, G. Bertolone, A. Besson, A. S. Brogna, C. Colledani, G. Claus, R. D. Masi, Y. Degerli, A. Dorokhov, G. Doziere, W. Dulinski, X. Fang, M. Gelin, M. Goffe, F. Guilloux, A. Himmi, K. Jaaskelainen, M. Koziel, F. Morel, F. Orsini, M. Specht, Q. Sun, I. Valin, and M. Winter, “CMOS pixel sensor development: a fast read-out architecture with integrated zero suppression,” *Journal of Instrumentation*, vol. 4, pp. P04012–P04012, apr 2009.
- [11] J. Baudot, G. Bertolone, A. Brogna, G. Claus, C. Colledani, Y. Değerli, R. De Masi, A. Dorokhov, G. Doziere, W. Dulinski, M. Gelin, M. Goffe, A. Himmi, F. Guilloux, C. Hu-Guo, K. Jaaskelainen, M. Koziel, F. Morel, F. Orsini, M. Specht, I. Valin, G. Voutsinas, and M. Winter, “First test results of MIMOSA-26, a fast CMOS sensor with integrated zero suppression and digitized output,” *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, pp. 1169–1173, 2009.

- [12] M. Pérez, J. Lipovetzky, M. Sofo Haro, I. Sidelnik, J. J. Blostein, F. Alcalde Bessia, and M. G. Berisso, "Particle detection and classification using commercial off the shelf CMOS image sensors," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 827, pp. 171–180, aug 2016.
- [13] M. Pérez, J. J. Blostein, F. A. Bessia, A. Tartaglione, I. Sidelnik, M. S. Haro, S. Suárez, M. L. Gimenez, M. G. Berisso, and J. Lipovetzky, "Thermal neutron detector based on COTS CMOS imagers and a conversion layer containing Gadolinium," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 893, pp. 157–163, jun 2018.
- [14] C. L. Galimberti, F. Alcalde Bessia, M. Perez, M. G. Berisso, M. Sofo Haro, I. Sidelnik, J. Blostein, H. Asorey, and J. Lipovetzky, "A Low Cost Environmental Ionizing Radiation Detector Based on COTS CMOS Image Sensors," in *2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, pp. 1–6, IEEE, jun 2018.
- [15] T. Hizawa, J. Matsuo, T. Ishida, H. Takao, H. Abe, K. Sawada, and M. Ishida, "32 × 32 pH image sensors for real time observation of biochemical phenomena," *TRANSDUCERS and EUROSENSORS '07 - 4th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, pp. 1311–1312, 2007.
- [16] ON Semiconductor, "NOIP1SN0300A Global Shutter CMOS Image Sensors," 2014.
- [17] N. Ida, *Engineering Electromagnetics*. Cham: Springer International Publishing, 3th ed., 2015.
- [18] J. F. Wakerly, *Digital Design: principles and practices*, vol. 1. Pearson, 1999.
- [19] M. Perez, F. Alcalde, M. S. Haro, I. Sidelnik, J. J. Blostein, M. G. Berisso, and J. Lipovetzky, "Implementation of an ionizing radiation detector based on a FPGA-controlled COTS CMOS image sensor," in *2017 XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC)*, pp. 1–6, IEEE, sep 2017.
- [20] R. Biswas, *An Embedded Solution for JPEG 2000 Image Compression Based Back-end for Ultrasonography System*. PhD thesis, IIT, Kharagpur, 2018.
- [21] T. Yanagisawa, T. Ikenaga, Y. Sugimoto, K. Kawatsu, M. Yoshikawa, S.-i. Okumura, and T. Ito, "New NEO search technology using small telescopes and FPGA," in *2018 IEEE Aerospace Conference*, vol. 2018-March, pp. 1–7, IEEE, mar 2018.
- [22] H. H. Goldstine and A. Goldstine, "The Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC)," *Mathematical Tables and Other Aids to Computation*, vol. 2, p. 97, jul 1946.
- [23] M. Perez, *DETECCIÓN DE RADIACIÓN IONIZANTE UTILIZANDO SENSORES DE IMAGEN CMOS COMERCIALES*. PhD thesis, 2018.
- [24] I. Micron Technology, "1 / 2-Inch Megapixel CMOS Digital Image Sensor MT9M001C12STM (Monochrome)," pp. 1–35, 2004.

- [25] S. of Cable Telecommuniocations Engineers, *American National Standard ANSI/SCTE 07 2006. Digital Tansmission Standard for Cable Television*. Society of Cable Telecommunica-tions Engineers, Inc., 2006.
- [26] IEEE Computer Society, *IEEE Standard for Ethernet*, vol. 2018. 2018.
- [27] IEEE Computer Society, *Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications IEEE Computer Society Specific requirements Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, vol. 2012. 2016.
- [28] Compaq, Hewlett-Packard, Intel, Lucent, Microsoft, NEC, and Philips, *Universal Serial Bus Specification*, vol. Revision 2.0. 2000.
- [29] “Usb hardware.” https://en.wikipedia.org/wiki/USB_hardware. Ingreso: 8 de agosto del 2019.
- [30] T. Riihonen, *Desing and analysis of duplexing Modes and Forwarding Protocols for OFDM(A) Relay Links*. PhD thesis, 2015.