

# *Sistema modular programable de bajo coste para la realización de In-Circuit Test (ICT)*

## *Desarrollo completo hardware, software y mecánico para una máquina ICT*

Jorge Emilio Monagas Martín  
Dpto. Ing. Electrónica y Automática  
Universidad de Las Palmas de GC  
España  
jorge.monagas@ulpgc.es

Artemi Sarmiento Nevado  
Instituto Microelectrónica Aplicada  
Universidad de Las Palmas de GC  
España  
artesarmino@gmail.com

Aurelio Vega Martínez  
Dpto. Ing. Electrónica y Automática  
Universidad de Las Palmas de GC  
España  
aurelio.vega@ulpgc.es

**Abstract**— Una máquina ICT es una herramienta que permite realizar test eléctricos en circuitos impresos ya montados mediante el contacto en ciertos nodos del mismo de un conjunto de puntas que monitorizan y/o fuerzan valores eléctricos en dicho circuito. En esta comunicación se presenta el desarrollo hardware, software y mecánico de un sistema de test modular de bajo coste para la realización de pruebas ICT sobre prototipos electrónicos de series pequeñas y medianas.

**Keywords**— *In-circuit test, instrumentación electrónica, buses de instrumentación*

### I. INTRODUCCIÓN

Cuando se plantea el desarrollo de un circuito electrónico (ya sea como elemento individual o formando parte de un sistema más complejo), la fase inicial de prototipado en la que se ponen a prueba la viabilidad de los criterios de diseño adoptados representa el mayor impacto sobre el coste de la creación del producto hasta la fase de disponibilidad para el usuario. Cuanto más se dilate en el tiempo esta fase, mayor será el coste económico de la misma. Son múltiples los elementos que determinan la duración de este proceso y, entre ellos, es inevitable la necesaria prueba real de funcionamiento del circuito electrónico ideado. En otras palabras, se debe fabricar físicamente prototipos de los circuitos electrónicos para verificar la validez práctica del diseño elegido.

En esta fase de prototipado de la electrónica, lo habitual es realizar el ensamblado de unas pocas unidades y éstas deben ser verificadas en todos sus aspectos operativos (niveles de tensión adecuados, consumos, interfaz eléctrico/lógico adecuado entre secciones, etc). Se debe controlar el cumplimiento de una serie de condicionantes:

- Número mínimo necesario de unidades a montar.
- Montaje debe ser correcto (soldaduras, etc).
- Verificación eléctrica.
- Verificación funcional.

Los fabricantes de circuitos impresos (en adelante, PCB) ofrecen servicios de verificación que pueden realizar tantas de estas tareas como desee el diseñador en el propio circuito ensamblado sin necesidad de añadir al diseño original ningún hardware específico para este propósito. Este tipo de pruebas, conocidas como ICT [1] (siglas en inglés de In-Circuit Test), no son baratas ya que el equipamiento necesario del fabricante para realizar estos servicios tiene un coste muy elevado. El efecto inmediato que el coste de estos servicios produce es que aumenta significativamente el coste de cada PCB fabricada debido precisamente a que en esta fase el número de unidades fabricadas es, por definición, muy bajo [2]. Esto es especialmente importante cuando se trata de desarrollos de series pequeñas y medianas destinadas a laboratorios docentes, pequeñas empresas, etc.

El desarrollo propuesto en este artículo busca precisamente incidir en el coste de los PCB de prototipado y de pequeñas/medianas series mediante la reducción drástica del coste del equipamiento necesario para realizar el ICT de los PCBs fabricados, de forma que los diseñadores no se vean obligados a renunciar a las pruebas ICT sobre sus prototipos debido al coste elevado de las mismas. El coste puede reducirse lo suficiente como para que los laboratorios con capacidad de ensamblar sus propios prototipos (o de fabricar series pequeñas) puedan plantearse la adquisición o fabricación propia del sistema ICT (In-Circuit Test) descrito en este artículo.

### II. PROS Y CONTRAS EN EL USO DEL ICT

Siempre hay que tener en cuenta que el uso de un sistema ICT para verificar el correcto funcionamiento eléctrico del PCB ensamblado es optativo. Es decir, el ingeniero de desarrollo siempre podrá optar por abaratar costes no usando servicios ICT y confiarse a su propia capacidad para revisar completamente cada sección del circuito ensamblado (y para cada PCB ensamblado). Esto, obviamente, conlleva un riesgo que se puede considerar aceptable según la complejidad del circuito diseñado y caso de tratarse de muy pocas unidades de prototipo (y que, en cualquier caso, no estén destinadas a llegar a manos de los usuarios). Sin embargo, el riesgo escala hasta límites probablemente inaceptables cuando el circuito tiene una

complejidad elevada y se trata ya de unidades finales (incluso para series pequeñas/medias). En cualquier caso, a la hora de considerar el uso o no de servicios o técnicas ICT, hay una serie de factores tanto a favor como en contra que se deben tener en cuenta. Entre las ventajas destacan:

- **Detección inmediata de posibles defectos de fabricación**, ya que la mayoría de fallos en los PCBs se deben a problemas asociados al proceso de ensamblado. Tales fallos son producidos por razones tan variadas como componentes mal insertados, de valor incorrecto, colocados en orientación indebida, cortocircuitos y circuitos abiertos.
- **Generación de secuencia de programación sencilla**, puesto que normalmente se toma la información directamente desde los archivos de diseño generados por la herramienta PCB.
- **Interpretación de los resultados directa**, dado que el sistema avisará o marcará el nodo con circuito abierto o componente con fallo de una forma intuitiva, lo que minimiza el tiempo de entrenamiento del personal que la opera.

Por otro lado, entre los aspectos negativos que deben valorarse al tomar la decisión de encargar las pruebas ICT al fabricante del PCB destacan:

- **Accesorios caros**, ya que los accesorios son mecánicos y requieren puntas y cables montados específicamente para cada diseño de circuito impreso.
- **Accesorios difíciles de actualizar** en caso de realizar cambios en el diseño. Si se considera necesaria una modificación del diseño que afecte a la ubicación de las puntas de test, se deberá pagar un accesorio nuevo lo que incrementa el coste.

La utilidad del método ICT y sus ventajas están fuera de cualquier duda, por lo que los aspectos negativos indicados más arriba no deben interpretarse como una razón para no usarlo sino como un conocimiento claro del coste real que puede tener su uso. El uso de un sistema ICT mucho más asequible en coste puede hacer que estas consideraciones negativas vean reducido su importancia hasta niveles aceptables.

### III. PROPUESTA DE DISEÑO

En este artículo se propone el diseño y la implementación de un sistema para realizar pruebas ICT que permitan la verificación de los PCBs ensamblados. Se propone un sistema modular escalable (ver Fig. 1) por medio de módulos que permiten ajustar el número de sondas de test (tanto digitales como analógicas) según las necesidades del diseño a verificar. Se ha tenido especial cuidado en los modos de operación del sistema. Por un lado, puede operar en modo periférico de PC manteniendo una interacción con el usuario a través del puerto USB y una aplicación de control en el PC. Por otro lado, el sistema puede leer la secuencia de test desde un dispositivo *flash* externo y trabajar a partir de ella de forma autónoma sin intervención del usuario, volcando los resultados del test de nuevo en el dispositivo externo para su posterior consulta por parte de aquel.

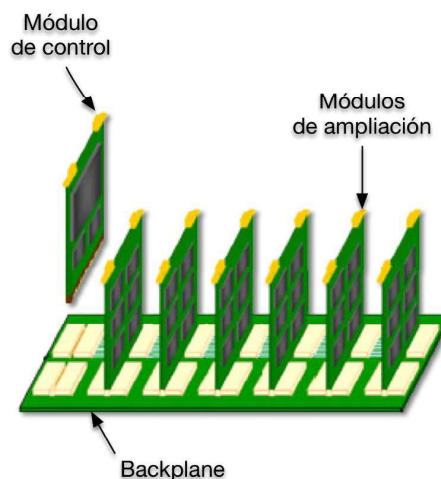


Fig. 1 Concepto de arquitectura modular

Los distintos módulos que se observan en Fig. 1 y que le otorgan la característica de modularidad a este sistema son:

1. **Módulo de control**, lleva el núcleo de procesamiento del sistema encargado del control de la secuencia de test, la adaptación de alimentaciones a niveles adecuados al diseño a testear y, además, lleva el control último de la alimentación del PCB bajo test. El corazón de este módulo es un  $\mu C$  ARM Cortex-M3 de *ST Microelectronics*.
2. **Módulos de ampliación**, contiene la electrónica asociada a cada punta de prueba. La capacidad del sistema, en lo que se refiere al máximo número de puntas de test que pueden conectarse al PCB en verificación, viene determinado por el número de módulos de este tipo que se estén utilizando. La Tabla 1 muestra la disponibilidad de puntas por cada módulo de ampliación que se use.

TABLA 1 PUNTAS POR MÓDULO

Nº sondas	Mín.	Máx.	V <sub>min</sub>	V <sub>max</sub>
<b>Digitales</b>	16	64	1.6V	5V
<b>Entradas Analógicas</b>	8	8	0V	5V
<b>Salidas Analógicas</b>	4	4	0V	5V

**Backplane**, en el que se insertarán tanto el módulo de control como los de ampliación. Distribuye tanto la alimentación como las señales de interfaz entre los diferentes módulos. La ubicación del módulo de control debe ser en el primer slot del *backplane*, mientras que los módulos de ampliación pueden ser ubicados libremente en cualquiera de los slots restantes sin necesidad de respetar ningún orden ni condición.

La filosofía de modularidad que se da a este sistema se refleja también en los rangos de tensión que pueden manejar las puntas. Por una mejor adaptabilidad a las características eléctricas del PCB a verificar, la electrónica de los módulos de ampliación puede ser configurada para trabajar dentro de rangos configurables de tensión (véase Tabla 1), pudiendo incluso

aplicar valores de tensión distintos a grupos de puntas de dentro de un mismo módulo. El control operativo de la configuración de las sondas en cada módulo es responsabilidad del firmware en el módulo controlador.

Desde un punto de vista mecánico, este sistema se basa en una estructura de aluminio estructurado (ver Fig. 2) que proporciona una buena resistencia al armazón, y mantiene el peso total del sistema en un valor razonablemente bajo. Para el desplazamiento del PCB a verificar (en su contacto con las puntas) se plantea el uso de rieles de aluminio que integren un deslizador de plástico compacto mucho más preciso. Los soportes de la estructura son regulables para garantizar una perfecta estabilidad en cualquier superficie.



Fig. 2 Estructura de soporte

Los módulos electrónicos se integran en una estructura tipo rack para tarjetas con factor de forma simple Europa (ver Fig. 3). Al elegir un rack adecuado es importante tener en cuenta la facilidad de modificación de la separación entre los módulos insertados. En este sistema, el diseño de los módulos de ampliación exige que en el rack haya, al menos, unos 20'32 mm de separación entre módulos adyacentes.



Fig. 3 Rack de módulos

El rack incluye además el espacio necesario para la fuente de alimentación del sistema. Ésta tendrá una toma de corriente a 220VAC/60Hz y entregará al sistema una tensión estable de 12VDC, a partir de la cual desde el módulo de control se generarán las diferentes tensiones a utilizar en cada módulo. La Tabla 2 muestra las tensiones eléctricas requeridas por el sistema (el rango para las tensiones digitales indica el de las tensiones

para expresar un nivel lógico alto, por lo que se cubrirían un amplio espectro de familias lógicas digitales).

TABLA 2 TENSIONES DEL SISTEMA

Tensión	Min	Máx
$V_{in}$	12V	12V
$V_{in}$ digitales	1'6V	5V
$V_{out}$ digitales	1'6V	5V
$V_{in}$ analógicas	0V	10'5V
$V_{out}$ analógicas	0V	5V
$V_{CC}$ para PCB <sub>TEST</sub>	0V	10'5V

#### IV. ARQUITECTURA HARDWARE

Desde el punto de vista de la cadena electrónica que va desde la orden de control de una punta hasta la electrónica que controla directamente la punta tal como se lo han indicado, podemos destacar dos subsistemas electrónicos. El primero de ellos, al que denominaremos *subsistema principal*, se ubica en el módulo de control y el segundo, denominado *subsistema de sonda*, en el módulo de ampliación. La Fig. 4 muestra un diagrama de bloques del *subsistema principal* (y su relación de interfaz con el *subsistema de sonda*, señalado como circuito expensor).

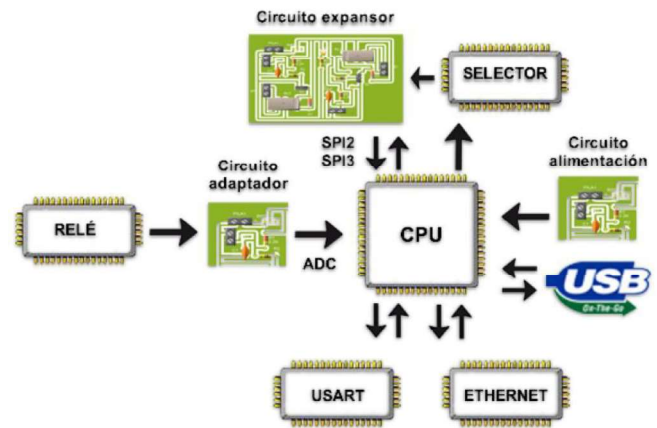


Fig. 4 Subsistema principal

El *subsistema principal* se basa en un  $\mu C$  con soporte para: conexión USB OTG, puerto de comunicaciones Ethernet, puerto serie USART y un ADC. Este último permite al  $\mu C$  monitorizar la tensión de alimentación que se entrega al PCB bajo test y detectar una posible caída de la misma (claro indicador de un problema en la cadena de alimentación del circuito), en cuyo caso puede abrir inmediatamente el relé y proteger a la fuente. Como interfaz de acceso al *subsistema de sonda* integra un selector que bajo control del  $\mu C$  permitirá que éste acceda (mediante buses serie tipo SPI) a cualquiera de los posibles 16 (máximo) *subsistemas de sonda*.

Por su parte, el circuito de alimentación convierte la tensión nominal de entrada de 12V a los voltajes inferiores necesarios específicos para los componentes utilizados tanto en el *subsistema principal* como en el *subsistema de sonda*.

El *subsistema de sonda* controla el estado eléctrico de las puntas de E/S, tanto digitales como analógicas. La Fig. 5 muestra

el diagrama de este sistema secundario. Se puede observar que el diseño de la electrónica de las puntas digitales es igualmente escalable, pudiendo decidir si montar un módulo de ampliación con 16, 32, 48 ó 64 puntas (manteniendo el mismo circuito impreso para el módulo de ampliación). Esto confiere un punto adicional de modularidad al sistema, permitiendo un ajuste más aproximado a la cantidad real del número de puntas que se puedan necesitar para un diseño PCB concreto, lo que en última instancia permite también ajustar aún más el coste de verificación de un diseño.

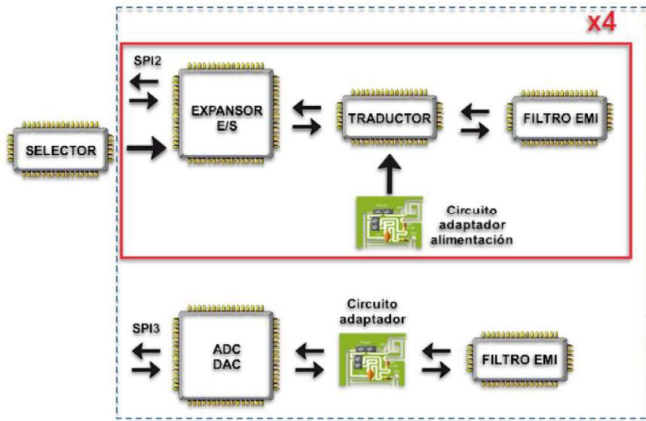


Fig. 5 Subsistema de sonda

Tanto en el *subsistema principal* como en el *subsistema de sonda*, el diseño electrónico tiene en cuenta los criterios de compatibilidad electromagnética en la elección de los componentes y en el propio diseño de la circuitería. Se incluyen una serie de elementos de filtrado para protección frente a interferencia electromagnéticas (EMI) en cada interfaz de los diferentes módulos. Además, el diseño de los circuitos impresos para cada uno de los módulos cumple una serie de características físicas:

- Formato simple-europa, es decir, 100mm x 160mm
- Protección frente EMI y aplicación de criterios de compatibilidad electromagnética
- Modularidad interna de la electrónica digital en módulo de ampliación
- Facilidad de ensamblaje de componentes electrónicos (elección apropiada de encapsulados)

Para dar cumplimiento a la aplicación de los criterios de compatibilidad electromagnética es necesario que las placas sean multicapa. Se optó por un diseño de 4 capas (ver Fig. 6) que permitiera trazar adecuadamente las señales de alimentación y masa, así como una mejor separación de los planos de referencia.

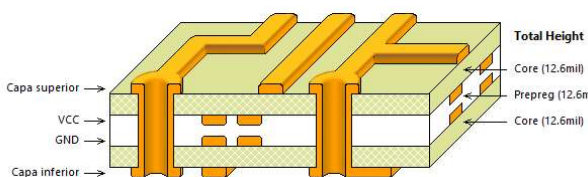


Fig. 6 Capas PCB

Se aplicaron las reglas de diseño estándar [3] para la fabricación de circuitos impresos clase 5:

- **Anchura mínima de pista**, establecido en 8 mil. En la medida de lo posible se usan pistas de señal con mayor anchura (típicamente 10 mil), y con especial atención a las pistas de alimentación con un rango de entre 12 – 30 mil.
- **Diámetro mínimo de las vías**, siendo el tamaño de la vía de señal de 26/12 mil y las de alimentación de 30/15 mil, diámetro y taladro respectivamente.
- **Separación mínima entre pistas**, que como mínimo es de 8 mil (salvo necesidades específicas), si bien se han separado siempre lo mayor posible en cada caso.

La Fig. 7 muestra el modelo 3D del circuito diseñado para el módulo principal y que incluye los componentes que forman parte del subsistema principal (ver Fig. 4).

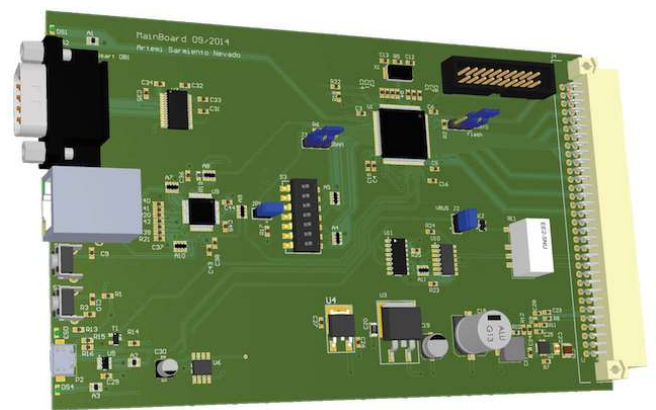


Fig. 7 Modelo 3D módulo principal

En la parte frontal se aprecian los conectores para los distintos tipos de conexiones disponibles para interactuar con el sistema de test diseñado. Puede apreciarse de hecho que, si bien la versión actual del sistema no ofrece conexión en red, el módulo principal sí dispone del conector Ethernet (RJ-45) estándar y de la electrónica necesaria para implementar esta funcionalidad (parte de ella integrada como periférico en el propio  $\mu$ C). Por otro lado, el conector interno en placa corresponde a la conexión JTAG necesaria para la programación del firmware del microcontrolador y, en su caso, la depuración del mismo. La conexión al backplane se realiza con un conector estándar DIN 41612 de 64 pines.

De igual forma, para el módulo de expansión se realizó un diseño cuyo modelo en 3D se observa en la Fig. 8. Se aprecia la simetría del diseño que permite, para un mismo circuito impreso, escalar el número de sondas (digitales) que se desea poder utilizar como máximo en ese módulo (marcado en esquema de Fig. 5). Para ello, el total máximo de 64 sondas digitales se distribuyen en 4 conectores de 16 pines cada uno. Por razones de espacio, estos conectores se ubican 2 en el frontal del módulo y otros 2 en el interior. El tercer conector disponible en el frontal del módulo es el que corresponde a las sondas analógicas.

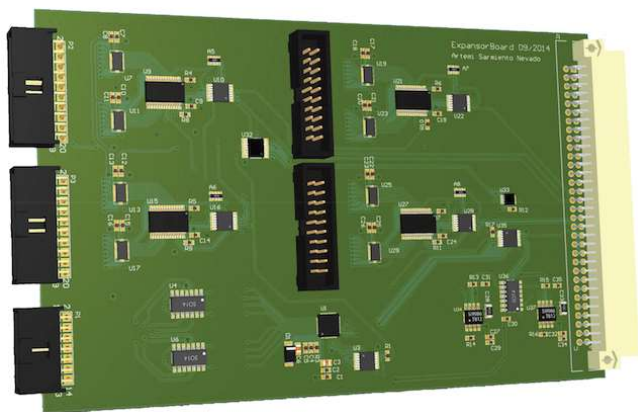


Fig. 8 Modelo 3D del módulo expansor

## V. ARQUITECTURA FIRMWARE

La programación bajo la que opera el sistema se divide en dos grandes aplicaciones. Por un lado, el firmware ejecutado por el  $\mu$ C del módulo de control y que es responsable de la gestión de todos los recursos hardware del sistema en todos sus módulos. Por otro lado, la aplicación [3] de usuario que se ejecuta en el PC al que (opcionalmente) se puede conectar el sistema y que permite enviar comandos de acción en tiempo real al sistema, así como editar los ficheros de test necesarios para definir la secuencia de pruebas a realizar.

En la Fig. 9 se observa la máquina de estado (FSM) que define el flujo de operación del firmware del sistema. Básicamente, una vez completada la inicialización adecuada de los diferentes recursos de interfaz hardware, el sistema queda a

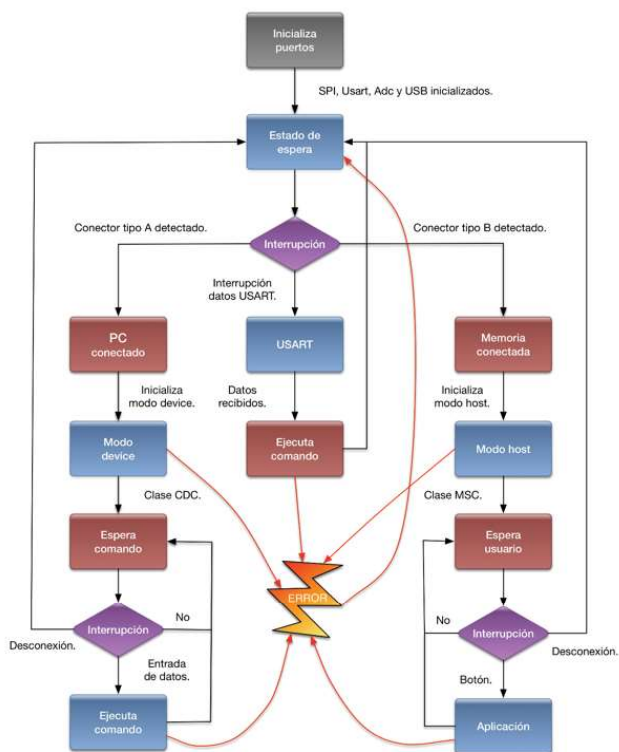


Fig. 9 FSM del firmware

la espera de decidir el tipo de operación que va a realizar. Ésta puede ser:

- **Modo autónomo:** el sistema lee un archivo que contiene la secuencia de pruebas a realizar y la realiza tan pronto el usuario pulsa el botón de inicio. No necesita de conexión a un PC ya que el intercambio de datos con el usuario se realiza mediante una memoria *flash* externa conectada al puerto USB de la máquina.
- **Modo periférico:** mediante el puerto USB se conecta a un PC y recibe desde éste comandos de configuración y de test aplicados a las puntas que se elijan.

De acuerdo a la FSM de la Fig. 9, una vez que el firmware se inicializa y queda en estado de espera, las acciones que determinan su modo de operación pueden ser:

- **Inserción de conector tipo A en USB,** corresponde al tipo de conector usado para periféricos USB [4] y, por tanto, el sistema asume que opera en modo periférico y espera la conexión con un PC. Esto fuerza la inicialización del bus USB interno en modo *device* y la asociación de la clase CDC para la comunicación con el *host* (PC) [4]. Inicializado el USB se pasa a un estado de espera de comando que tiene dos tipos posibles de interacciones...
  - **Datos desde el PC,** lo que provoca la generación de una interrupción para su captura y la ejecución de la acción asociada al comando recibido. Retorna al mismo estado de espera de comando al finalizar la acción asociada.
- **Desconexión,** cuando el usuario desconecta literalmente el cable del puerto USB. El sistema sale del modo de operación periférico y retorna al estado de espera principal esperando de nuevo el modo de operación elegido.
- **Inserción de conector tipo B en USB,** en este caso corresponde al tipo de conector que gestiona un *host* USB [4] y, por tanto, el sistema espera la conexión con una memoria externa *flash*. Se inicializa el bus USB interno en modo *host* y se asocia el dispositivo con la clase MSC para la lectura y escritura de datos en la memoria externa [4] (ver Fig. 10). El sistema carga desde la memoria el fichero con la secuencia de pruebas a realizar y, una vez cargado, entra en un estado de espera de acción de usuario con dos tipos de interacciones posibles...
  - **Botón de inicio pulsado,** lo que genera una interrupción que desencadena las acciones pertinentes para dar inicio del test descrito en el fichero cargado. La finalización del test provoca la escritura a la memoria *flash* externa del fichero de resultados del mismo.
  - **Desconexión,** cuando el usuario desconecta la memoria *flash*. El sistema sale del modo de operación *host* y retorna al estado de espera principal esperando de nuevo el modo de operación elegido.

- **Paquete de datos recibido por la USART**, lo que implica que no se está usando la conexión USB del sistema sino el puerto RS-232. Su operación sería similar al modo periférico USB, salvo que tras cada comando ejecutado vuelve al estado de espera principal.

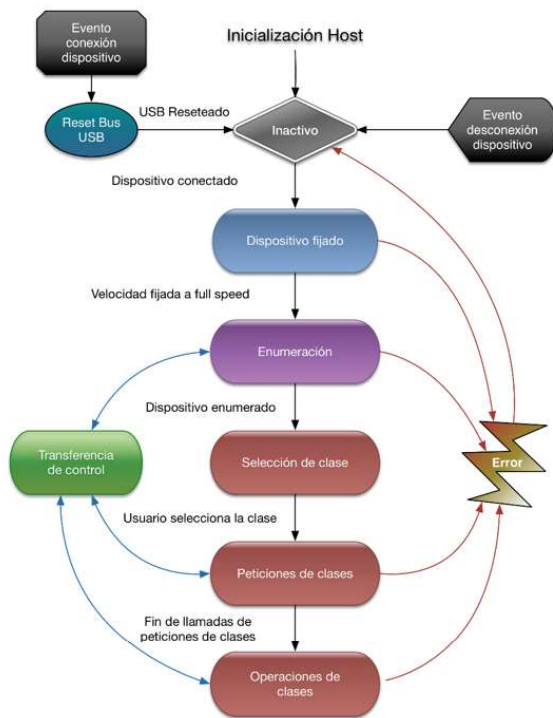


Fig. 10 FSM modo Host

Tal y como recoge la máquina de estado descrita en Fig. 9 (así como en la Fig. 10), pueden producirse determinadas condiciones que generen un error de operación, que será notificado visualmente al usuario mediante los LEDs de la carcasa de la máquina, y del que sólo se podrá salir mediante el reset del sistema. En cualquier caso, el contenido de la memoria *flash* siempre quedará protegido por un mecanismo de extracción segura en software.

Conviene destacar que el sistema, en caso de operar en modo host, espera la memoria *flash* externa con un sistema de archivos FAT32 [5], para lo que se ha programado el firmware del sistema para disponer de acceso completo a memorias formateadas con este sistema.

En el modo de operación periférico de PC, o en modo de conexión RS-232, los comandos disponibles para controlar la operación del sistema son los siguientes:

- **Estado:** indicador de conexión correctamente establecida.
- **Módulos:** devuelve el número de módulos de ampliación conectados al sistema.
- **Cambio de velocidad:** uso exclusivo para ajustar la velocidad de la conexión RS-232 (desde 9600 hasta

230400 bps). No es aplicable a la conexión virtual serie vía USB.

- **Sondas analógicas:** informa al firmware del número de sondas analógicas conectadas.
- **Sondas digitales:** informa al firmware del número de sondas digitales conectadas.
- **Tensión PCB<sub>TEST</sub>:** informa de la tensión a suministrar al circuito bajo test, ya que el firmware debe monitorizar este valor y cortar la alimentación al circuito si detecta su caída (indicio de cortocircuito o consumo excesivo de corriente).
- **Fin:** indicación de test finalizado y que el sistema debe reiniciar el estado de las sondas.
- **Test de sonda:** realiza un test en la sonda identificada en este comando, señalando los parámetros de configuración del test para esa sonda.

El comando de test de sonda tiene una longitud fija de 26 caracteres de texto, independientemente del tipo de sonda a utilizar (digital o analógica, entrada o salida). La Fig. 11 muestra la estructura del paquete de datos que conforma este tipo de comando.

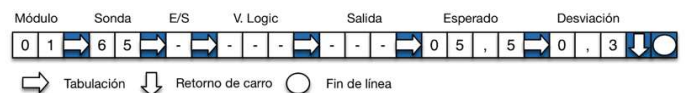


Fig. 11 Comando 'Test de sonda'

Los campos iniciales *Módulo* y *Sonda* permiten identificar con exactitud la sonda a la que va dirigida este comando dentro del conjunto de sondas de la máquina. Debe tener en cuenta que los módulos se identifican numéricamente del 1 al 16, mientras que las sondas se identifican numéricamente dentro de cada módulo siguiendo la numeración indicada en la Tabla 3.

TABLA 3 CONFIGURACIÓN SEGÚN TIPO DE SONDA

	Digital		Analógico	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Módulo	1-16		1-16	
Sonda	1-64		1-64	
E/S	E	S	E	S
V. Lógica	1'65V – 5V		--	
Salida	--	HI / LO	--	0V – 5V
Esperado	HI / LO	--	0V – 10'5V	--
Desviación	--		0V – 9'9V	

Para las sondas que actúan como entradas, ya sean digitales o analógicas, mediante este comando se especifica no sólo el valor esperado (indicador del correcto funcionamiento del circuito bajo test) sino la desviación máxima admisible sobre este valor (sólo aplicable para sondas analógicas). Para las salidas digitales se especifica la tensión de trabajo de estas salidas (de 1'6V a 5V) y el estado al que se desea poner el punto del circuito donde se ubica la sonda (alto o bajo). Para las salidas

analógicas, directamente se especifica la tensión a la que se desea forzar el punto del circuito (de 0V a 5V).

## VI. ARQUITECTURA SOFTWARE DE APLICACIÓN

La aplicación de PC que controla la operación de la máquina de test cuando ésta opera en modo periférico se ha desarrollado en el entorno LabView® de *National Instruments* [6]. Se ha realizado con la idea de ofrecer un entorno totalmente gráfico que permita al usuario interactuar con la máquina de test mediante los comandos comentados anteriormente, así como la confección de la secuencia de acciones sobre las sondas a emplear y que representa el conjunto de pruebas al que se quiere someter el circuito. La Fig. 12 muestra el diagrama de flujo de la aplicación de usuario.

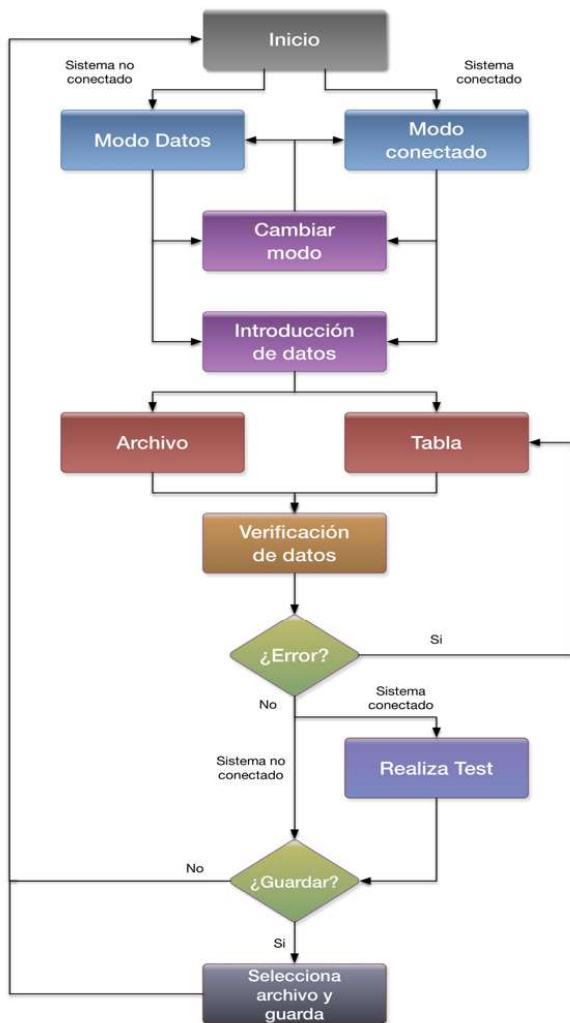


Fig. 12 Flujo aplicación PC

La configuración de la secuencia de sondas define el patrón de pruebas a realizar. Éste se puede enviar directamente a la máquina por medio de la conexión activa vía USB (modo de operación periférico) o RS-232, o bien se puede guardar como un archivo Excel que podrá ser leído directamente por la

máquina desde una memoria *flash* conectada a su puerto USB (modo de operación autónomo). La aplicación permite definir cada uno de los campos definidos para el comando de test de sonda comentado anteriormente. La Tabla 3 muestra un resumen de los valores posibles para cada campo del comando de test.

Una vez que el usuario ha definido completamente la secuencia de acciones de configuración para cada sonda a usar en el test, puede lanzar la ejecución del test directamente hacia la máquina de test conectada. Durante la ejecución del mismo, la aplicación va mostrando en pantalla en tiempo real los resultados obtenidos para cada sonda junto con un indicador de resultado. La Fig. 13 muestra la interfaz de usuario de la aplicación durante la ejecución del test programado.

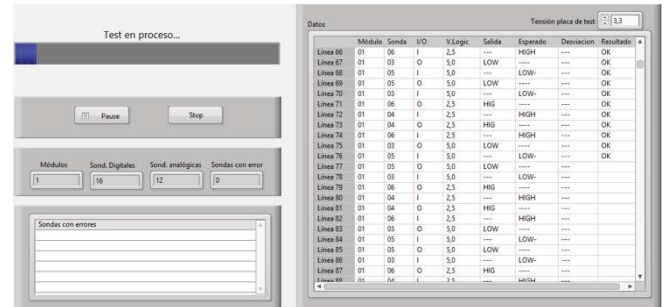


Fig. 13 Test en ejecución

## VII. RESULTADOS

Se había fijado como objetivo principal obtener un sistema de test de bajo coste. El diseño propuesto busca la simplicidad de uso, el empleo de electrónica sencilla con componentes asequibles y de fácil ensamblado, y la escalabilidad que permita ajustar el uso de recursos de la máquina para un diseño PCB dado. Estos objetivos se han cumplido mediante la decisión de separar la electrónica en diferentes módulos, manteniendo aparte el núcleo de procesamiento y flexibilizando no sólo la elección del número de módulos de ampliación sino también, y gracias a su diseño simétrico, pudiendo disponer de estos módulos con un número distinto de sondas (y aún manteniendo un único circuito impreso para el módulo de ampliación).

Al considerar el coste final de la máquina de test propuesta, debemos tener en cuenta que no se buscaba un producto que comercializar sino más bien un producto de desarrollo propio por parte de aquel laboratorio o pequeña empresa que deseara disponer de una herramienta como ésta. Teniendo esto en mente, consideramos que el coste del material hardware necesario para el ensamblaje de una máquina con un diseño estructural como el propuesto en este artículo se sitúa por debajo de los 3000€, para un sistema con un único módulo de ampliación. Las ampliaciones serían a razón de menos de 100€ por módulo de ampliación completo. En esta evaluación del coste se considera que gran parte de los recursos de desarrollo necesarios ya están disponibles (pero, de no ser así, supondría un coste fijo inicial de algo menos de 5000€ en concepto de licencias).

El diseño propuesto, haciendo uso del máximo de recursos, tiene la capacidad de realizar test de circuitos impresos mediante la monitorización y control de hasta 1216 nodos del mismo

(1024 digitales de E/S, 128 analógicos de entrada y 64 analógicos de salida). Cada sonda empleada, ya sea digital o analógica, es configurable en un rango de tensión suficiente para la inmensa mayoría de los diseños y dispone de las adecuadas protecciones ESD y EMI. Además, el software desarrollado dota al usuario de una elevada capacidad de control del proceso de test y simplifica enormemente la tarea de configuración de las sondas a emplear en el test, permitiendo igualmente crear un patrón de pruebas replicable en tantas máquina como se desee operando en modo autónomo.

Las pruebas realizadas con los prototipos del sistema propuesto han sido altamente satisfactorias, cumpliendo los objetivos técnicos inicialmente planteados. Se han realizado varias pruebas de operación tanto con la máquina en modo periférico y siendo comandada desde la aplicación de PC, como en modo autónomo cargando la lista de test a realizar desde una unidad *flash* externa. En las varias pruebas se constató que debido a la diferente forma de operar, el modo autónomo era más rápido que el periférico en completar la batería de test. Así, por ejemplo, para una secuencia de test que verificaba un total de 1024 puntas digitales y 192 analógicas, el tiempo total de realización de las medidas fue de  $\approx 1$ sg para el modo autónomo y de  $\approx 2$ sg para el modo periférico.

En el ámbito de la docencia, el estudio de este sistema permitirá mostrar a los alumnos una implementación práctica de los conocimientos que reciben en aquellas asignaturas que recogen contenidos relacionados con electrónica analógica y digital, buses de comunicaciones, integración de equipos electrónicos, programación empotrada y, teniendo en cuenta los futuros desarrollos mencionados más abajo, dispositivos de lógica programable.

Desarrollos futuros sobre este diseño propuesto incluyen la integración de la máquina en un entorno de red. De hecho, el módulo principal ya dispone del hardware necesario para una conexión de red, sólo falta el desarrollo del driver necesario para este tipo de interfaz. Por otro lado, el diseño de los módulos de ampliación puede optimizarse mediante el empleo de dispositivos de lógica programable. Además, para potenciar el modo de operación autónomo, se considera la posibilidad de integrar en la propia máquina una pantalla que mejoraría la interacción con el usuario en este modo de trabajo.

## REFERENCES

- [1] Radio-electronics [En línea]. (S.F.) ICT, In Circuit Test Tutorial. Disponible en Web. [Consulta: Enero 2016]  
[http://www.radio-electronics.com/info/t\\_and\\_m/ate/ict-in-circuit-test-tutorial.php](http://www.radio-electronics.com/info/t_and_m/ate/ict-in-circuit-test-tutorial.php)
- [2] Silvers Circuits [En línea]. (S.F.) PCB Price. Disponible en Web. <http://www.custompcb.com/> [Consulta: Enero 2015].
- [3] Lab-Circuits S.A. [En línea], Parámetros de fabricación multicapa. Disponible en Web. [Consulta: Enero 2016]  
[http://www.lab-circuits.com/es/para\\_fabricacio\\_multicapa.php?unitat=2](http://www.lab-circuits.com/es/para_fabricacio_multicapa.php?unitat=2)
- [4] USB. [En línea]. (S.F.) USB-IF Developers Area. Disponible en Web. <http://www.usb.org/developers> [Consulta: Enero 2015].
- [5] Microsoft. [En línea]. (Diciembre de 2000). Microsoft EFI FAT32 File System Specification. Disponible en Web. [Consulta: Enero 2016].  
<http://www.microsoft.com/whdc/system/platform/firmware/fatgen.mspx>
- [6] National Instruments. [En línea]. (S.F.) NI Labview Disponible en Web. <http://www.ni.com/labview/esa/> [Consulta: Enero 2015].