

Evolución de la instrumentación electrónica programable

Resumen

En la actualidad, la instrumentación electrónica afronta constantes cambios y se ha convertido en una herramienta indispensable para ingenieros, científicos y técnicos que requieren de sistemas electrónicos de medida y estimulación de gran exactitud y precisión. Por un lado, el continuo avance de la microelectrónica, las prestaciones de los paquetes informáticos y el desarrollo de nuevas tecnologías en el diseño de sistemas de medida y estimulación para el control de procesos, verificación de productos, explotación de servicios, análisis de calidad, etc., han permitido el desarrollo de potentes sistemas automatizados de medida (ATE, *Automated Test Equipment*); mientras que por otro lado, es cada vez más común la utilización de computadoras personales (PC, *Personal Computer*) como el principal recurso en diversas áreas de aplicación, por ejemplo laboratorios, entornos industriales, sistemas de instrumentación, etc.

Los sistemas ATE guardan una gran dependencia respecto a los sistemas de adquisición de datos (DAQ, *Data Acquisition*) y para lograr la interconexión de los diversos sistemas electrónicos de medida existe un amplio número de protocolos de comunicaciones dedicados a dicha tarea, como son el bus de interfaz de propósito general (GPIB, *General Purpose Instrumentation Bus*), VXI (*VME Bus eXtension for Instrumentation*), PXI/CompactPCI (*PCI eXtension For Instrumentation*), MXI (*Multisystem Instrument Interface*), etc. Además, los nuevos conceptos como VISA (*Virtual Instrumentation Systems Architecture*), VXIplug&play e IVI (*Interchangeable Virtual Instruments*) han logrado estandarizar las bibliotecas software para el soporte de programación y control de los instrumentos electrónicos programables.

El estudio del GPIB, especificado en el estándar IEEE 488, ha alcanzado una enorme expansión permitiendo el diseño de complejos sistemas ATE implementados en diversas plataformas de computadoras bajo diferentes sistemas operativos, lo cual ha dado lugar al concepto de instrumentación virtual que, de forma paulatina, ha venido a reemplazar al concepto de instrumentación electrónica tradicional.

Los autores presentan la evolución de la instrumentación electrónica programable mediante un estudio general de las arquitecturas, herramientas hardware y software, y tendencias actuales en el campo de la instrumentación electrónica programable y virtual. Se presenta la historia del GPIB y compara con la propuesta HS 488 realizada por la firma National Instruments.

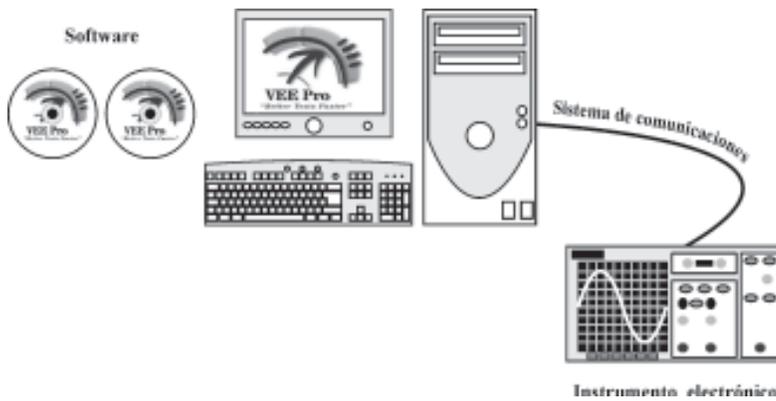
Palabras clave: instrumentación electrónica, instrumentación programable, instrumentación virtual, GPIB, HS 488.

1. Introducción

Los procesos en los que se apoyan la ciencia y tecnología generan variables físicas, las cuales se pueden medir mediante instrumentos que tienen como misión determinar la magnitud de una variable, visualizarla, generarla o convertirla en otra diferente.

El proceso de medición requiere el uso de instrumentos como medios físicos para determinar la magnitud de una variable. Los instrumentos constituyen una extensión de las facultades humanas y en muchos casos permiten a las personas determinar el valor de una cantidad desconocida, la cual no podría medirse utilizando solamente las facultades sensoriales, por lo tanto, un instrumento se puede definir como un dispositivo para determinar el valor o la magnitud de una cantidad o variable. El instrumento electrónico, como lo indica su nombre, se basa en principios eléc-

FIGURA 1. COMPONENTES BÁSICOS DE UN SISTEMA ATE.



tricos o electrónicos para efectuar alguna medición, puede ser un aparato relativamente sencillo y de construcción simple o un sistema complejo [1]. El desarrollo de la tecnología demanda la existencia de nuevos diseños e instrumentos con mayor exactitud (grado de aproximación o conformidad al valor real de la cantidad medida) y precisión (grado de concordancia dentro de un grupo de mediciones o instrumentos).

Ninguna medición se puede realizar con una exactitud perfecta, pero es importante descubrir el tipo de error, el cual puede ser de origen humano, sistemático o por causas que no se pueden establecer debido a las variaciones en los parámetros [2].

2. Instrumentación electrónica

La electrónica aplicada es el área de la tecnología que estudia las características de los dispositivos electrónicos y la forma de interconectarlos. El avance en la microelectrónica ha permitido convertir las señales de variables físicas (distancia, velocidad, temperatura, densidad, etc.) en señales eléctricas. De acuerdo con lo anterior, los instrumentos electrónicos se pueden clasificar en tres grandes grupos [3]:

- *Instrumentos de medida y visualización:* son los sistemas electrónicos que realizan la evaluación de uno o varios parámetros de una señal eléctrica y los presentan en forma gráfica, numérica o alfanumérica, por ejemplo el osciloscopio, el voltímetro, etc.
- *Instrumentos generadores de señales o de estimulación:* tienen como misión generar señales eléctricas de características determinadas, un ejemplo de este tipo de instrumento es el generador de funciones.
- *Instrumentos convertidores de señales:* son dispositivos o circuitos electrónicos que convierten una se-

ñal eléctrica o no eléctrica en otra señal eléctrica de características y rango determinado, ejemplo de ello son los sensores y los actuadores.

Los sistemas de adquisición de datos (DAQ) se utilizan para medir y registrar señales obtenidas a partir de mediciones de cantidades eléctricas y señales originadas a partir de instrumentos convertidores (transductores).

Los sistemas de instrumentación se pueden clasificar en dos clases principales, analógicos y digitales. El tipo de sistema de adquisición, así como también el instrumento a utilizar, depende del tipo de datos que se desea registrar. Los sistemas de adquisición de datos se utilizan en un gran número de aplicaciones, en diversas áreas industriales y científicas.

En el campo de la electrónica, uno de los avances más valiosos es el desarrollo de complejos sistemas de prueba y evaluación controlados por computadora conocidos como sistemas ATE [4, 5], los cuales básicamente se conforman de los siguientes elementos (Figura 1):

- *Un instrumento de medida tradicional:* se encarga de efectuar las mediciones necesarias.
- *Una computadora con software específico:* para realizar el análisis y procesamiento deseados, y presentar los datos en forma correcta.
- *Un sistema de comunicaciones:* permite la comunicación entre la computadora y el equipo de prueba.

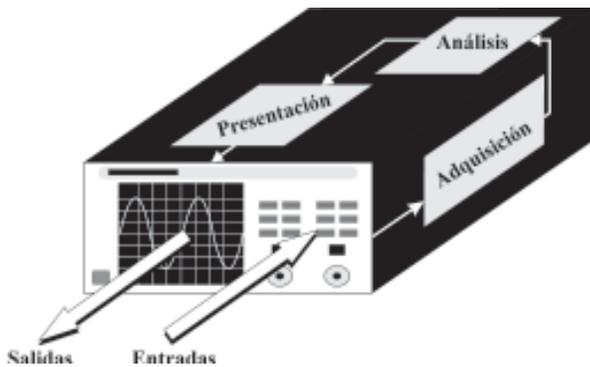
2.1. Evolución de la instrumentación electrónica

Desde la aparición de los primeros instrumentos electrónicos de medida, los cuales eran controlados mediante sus paneles frontales, éstos han adquirido gran flexibilidad y un alto grado de integración para interconectarse con otros instrumentos en sistemas más complejos.

A los instrumentos que pertenecen a la primera generación se les conoce como instrumentos de medida tradicionales (Figura 2), estos instrumentos limitaban la manipulación y procesamiento de medidas debido a que funcionaban manualmente a través de un panel frontal. Las etapas principales de un instrumento de medida tradicional son [6]:

- *Adquisición de datos:* para acondicionar, medir y registrar señales de las líneas de entrada del instrumento.
- *Análisis de datos:* realiza el análisis y procesamiento a la señal obtenida.
- *Presentación:* despliegan la señal de salida.

FIGURA 2. ETAPAS BÁSICAS DE UN INSTRUMENTO DE MEDIDA TRADICIONAL.



Generalmente, cada instrumento se diseña para realizar una medición en específico, por lo que los usuarios pueden incrementar el número de instrumentos para crear un sistema completo de medición, sin embargo el espacio de trabajo requerido aumenta considerablemente. Con el origen del GPIB los usuarios son capaces de controlar sistemas de instrumentación electrónica de forma remota mediante una secuencia de órdenes, dando origen al término de instrumentación electrónica programable.

Los instrumentos electrónicos programables son una combinación de computadoras de propósito general con instrumentos tradicionales y de nueva generación; estos modernos instrumentos pueden alcanzar nuevos niveles de ejecución y flexibilidad al combinar rutinas de software con nuevas clases de hardware de instrumentación; además, con la implementación de nuevas técnicas de control de instrumentos, como son la programación basada en registros y memoria compartida, se puede optimizar el uso de la computadora para un procesamiento avanzado al adquirir, analizar y presentar resultados de las mediciones requeridas en forma virtual, dando origen al término instrumentación virtual (VI, *Virtual Instrumentation*).

Con los instrumentos virtuales se puede tener una gran variedad de dispositivos de instrumentación, respaldados por rutinas de software que permiten la creación de interfaces gráficas de usuario (GUI, *Graphic User Interface*) de alta resolución y flexibilidad.

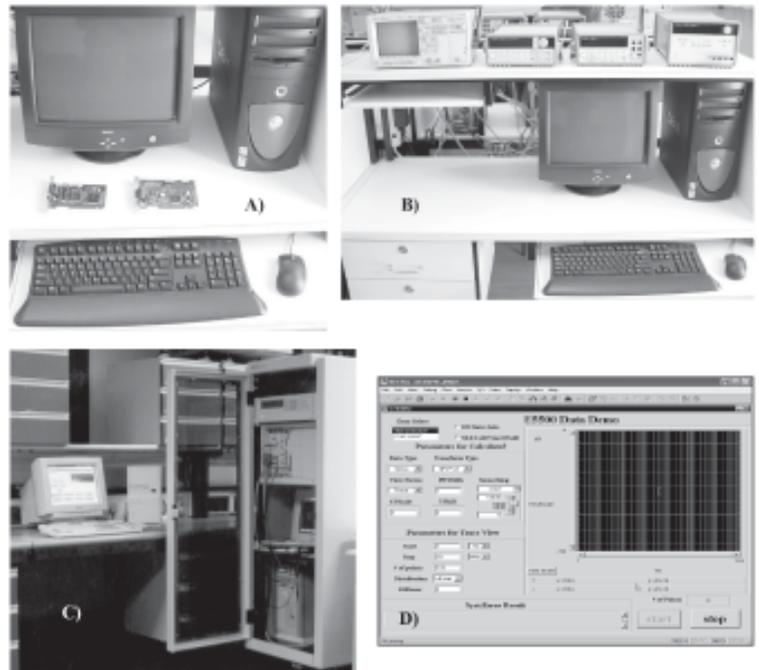
Las siguientes son definiciones de la instrumentación electrónica programable y virtual respectivamente [7]:

- *Instrumentación electrónica programable*: se define como una GUI en una PC controlando a un instrumento tradicional mediante un medio de comunicación GPIB o RS-232 (Figura 3.B); una GUI en una

PC controlando a una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) de tipo *plug-in* (Figura 3.A); o a un módulo VXI mediante la comunicación GPIB (Figura 3.C).

- *Instrumentación virtual*: se define como una GUI sin instrumentos físicos conectados a una computadora personal (Figura 3.D).

FIGURA 3. DIFERENTES CONFIGURACIONES DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA PROGRAMABLE Y VIRTUAL.



En algunas aplicaciones es necesario utilizar las medidas de los instrumentos para la toma de decisiones en cuanto al control de procesos de fabricación, de gestión, etc., lo cual ha dado origen a los sistemas ATE.

Para comprender la instrumentación electrónica, es importante conocer como han evolucionado los instrumentos a lo largo de los años. La Tabla 1 presenta algunos hitos y eventos importantes en la historia de la instrumentación electrónica [8].

3. Bus de interfaz de propósito general

Uno de los estándares más importantes dentro de la instrumentación electrónica es la interfaz IEEE 488 [9, 10], conocida ampliamente como GPIB, diseñada para integrar uno o más instrumentos a una computadora o controlador. La estandarización de dicha interfaz permite la conexión entre sistemas de medida de diferentes fabricantes, dando origen a los sistemas ATE.

TABLA 1. EVOLUCIÓN DE LOS BUSES DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA.

Año	Evento histórico
1960	Bucle de corriente de 4-20mA para sensores y actuadores, basado en la red télex de 1920 (teletipo o TTY). Norma ANSI MC12.1 e ISA S50.1. Posteriormente fue incorporado al protocolo HART para sensores inteligentes.
1965	Hewlett-Packard desarrolla un bus paralelo para conectar instrumentos de medida a una computadora, denominado HP-IB (Hewlett-Packard Instrument Bus). La computadora actúa como controlador y tiene la capacidad de emitir órdenes a los instrumentos y leer de los mismos las medidas realizadas.
1969	Conexión serie IEA RS232-C (también CCITT V.24 y V.28), que se convirtió en el "puerto serie" de propósito general para comunicarse a baja velocidad (9600 Kbps) en distancias cortas (10m). Evolución a la norma IEA RS-485 que en los años 80 se implementa como la capa física de los buses de campo (Fieldbus) de dos hilos, dando un gran impulso a las comunicaciones industriales.
1975	Primer sistema de tarjetas de bus común de propósito general S-100 de la firma MITS para el μ C 8080 de Intel (Norma IEEE 696). El IEC y el IEEE adoptan el bus de instrumentación programable HP-IB bajo las normas IEC 625 e IEEE 488 respectivamente. Este bus pasa a denominarse GPIB.
1978	La ISO presenta un modelo de interconexión de sistemas abiertos (OSI) para el desarrollo de protocolos normalizados en comunicaciones (LAN, MAN y WAN).
1981	Bus común (mother board) para PC's denominado ISA propuesto por IBM (norma IEEE 996). Desarrollo generalizado de tarjetas conectables al PC para aumentar sus funciones y convertirlo así en una plataforma multipropósito.
1983	Bus FASTBUS de los comités NIM y ESONE para experimentación en física de altas energías (Normas IEEE 960 e IEC 935).
1984	General Motors impulsa la norma MAP (Manufacturing Automation Protocol) para el desarrollo de un protocolo de mensajes de fabricación en tiempo real en el nivel de aplicación OSI. Aparición de numerosos buses de campo.
1985	Ante la falta de compatibilidad entre controladores e instrumentos GPIB de diferentes fabricantes, Tektronix propone un conjunto de formatos estándares para órdenes y respuestas de instrumentos programables GPIB.
1987	La propuesta de Tektronix es adoptada por el IEEE bajo la norma IEEE 488.2 de protocolos de intercambio de mensajes, formatos de datos, sintaxis, informes de estado y órdenes comunes a distintos tipos de instrumentos programables. La norma original IEEE 488 pasa a denominarse IEEE 488.1. Bus común VXI (VME eXtensions for Instrumentation) basado en VME (Versa Module Europe) para instrumentación programable modular con instrumentos en forma de tarjetas. Creación del consorcio VXI (VXI consortium).
1989	National Instruments desarrolla el bus de cable MXI (Multisystem Instrument Interface) proporcionando así un mecanismo de altas presentaciones para interconectar sistemas de instrumentación programable VXI y controlarlos desde una PC. Se crea la asociación PCMCIA (Personal Computer Memory Card International Association) como un estándar para el intercambio de datos en las computadoras portátiles.
1990	Propuesta de la norma SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) que especifica un extenso conjunto de órdenes en formato ASCII (American Standard Code for Information Interchange) para manejar la gran variedad de funciones que realizan los instrumentos programables. Junto con IEEE 488.2 permite la compatibilidad entre instrumentos modulares en tarjetas VXI. Creación del consorcio SPCI (SCPI Consortium) y desarrollo acelerado de herramientas de programación compatibles en instrumentación programable.
1991	Se define la interfaz de conexión PCMCIA de entradas y salidas en un conector de 68 terminales que se utiliza en tarjetas de memoria.
1992	Bus de interconexión SCI para enlazar sistemas de bus común en aplicaciones distribuidas de alta velocidad (IEEE 4596). Proyecto ISP (Interoperable System Project) para especificar una norma de bus de campo global que dio lugar al estándar ISA/IEC SP50.
1993	El IEEE adopta el bus VXI como norma IEEE 1151. Fundación de la alianza VXI&plug&play para buscar un mayor nivel de estandarización con respecto a todos los componentes de un sistema de instrumentación programable VXI.
1994	Se da a conocer la versión 0.7 del USB (Universal Serial Bus).
1995	Se da a conocer la especificación CompactPCI para la conexión de instrumentos mediante el bus PCI (Peripheral Component Interconnection), actualmente estandarizado bajo las normas ANSI 310-C, IEC-297, IEEE 1101.1, IEEE 1101.10 y P 1101.11.
1997	Bus común PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) basado en PCI propuesto por National Instruments para instrumentación programable en tarjetas. Norma IEEE 802.11 para redes inalámbricas de corto alcance (WLAN). National Instruments propone la especificación HS 488 para aumentar la velocidad del bus de instrumentación programable GPIB (IEEE 488.1 y 488.2) a 8 MBps.
1998	Se adoptan IVI (Interchangeable Virtual Instruments) y VISA (Virtual Instrumentation Software Application) para la implementación de sistemas empujados (firmware) que necesiten interactuar en el campo de la instrumentación basada en VXI, GPIB, PXI y comunicación serie. Se da a conocer la revisión 1.1 al estándar USB que corrige errores del estándar original.
2000	La división de instrumentación de Hewlett-Packard para a ser Agilent Technology es.
2001	Se define el estándar USB 2.0 de alta velocidad.

En el bus GPIB se pueden conectar hasta 15 instrumentos o dispositivos, los cuales se comunican unos con otros bajo una configuración maestro/subordinado mediante cables y conectores requeridos por el bus. El control del sistema lo realiza un dispositivo maestro, llamado controlador, el cual generalmente es una computadora personal o un controlador de bus dedicado basado en un microcontrolador. El software requerido para el sistema puede ser implementado en cualquier lenguaje de programación, por ejemplo: Borland C++, C++ Builder, Borland Delphi, Visual C, etc.

Hoy en día, el GPIB contempla un protocolo que, mediante pocas órdenes, permite a los usuarios diseñar sistemas simples para realizar pruebas de medición complejas.

3.1. Historia del GPIB

Como se ha mencionado con anterioridad, el avance de la microelectrónica ha incrementado la complejidad y la capacidad de medición de los dispositivos, además de contar con una gran variedad de funciones para realizar pruebas.

Al intentar eliminar el elemento humano en la etapa de pruebas, que cada vez son más complejas, se necesita que los instrumentos tengan la capacidad de emitir datos (*hablar*) y recibir datos (*escuchar*). Esto originó que las empresas consideraran la necesidad de desarrollar una interfaz que permitiera la comunicación entre instrumentos de distintos fabricantes.

En el año 1965, la firma Hewlett-Packard, en la actualidad Agilent Technologies, dió a conocer un estándar que denominó HP-IB (*Hewlett-Packard Instrumentation Bus*), el cual especificaba la forma de interconectar sus sistemas de instrumentación mediante el uso de una computadora, en donde ésta actúa de controlador y tiene la capacidad de emitir órdenes a los instrumentos y leer de los mismos las medidas realizadas. Sin embargo la falta de un estándar que compatibilizara la interconexión de las computadoras con los sistemas de instrumentación de distintos fabricantes hizo que a partir de 1972 el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) iniciara una normalización. El resultado fue el estándar IEEE 488-1975 conocido como bus de interfaz de propósito general, o simplemente GPIB. Esta norma constituye un conjunto de especificaciones eléctricas, mecánicas y funcionales.

La norma GPIB fue adoptada en Europa bajo la denominación IEC 625.1 por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, *International Electrotechnical Commission*). En enero de 1976, el Instituto Nacional de Estándares Americanos (ANSI, *American National Standard Institute*) publicó un estándar idéntico denominado MC1.1 [11].

En el año 1987 se logró un avance significativo al conseguir sistemas más fiables y fáciles de programar, por lo que el IEEE propuso modificaciones bajo el estándar IEEE 488.2, para crear sistemas compatibles y desarrollar programas flexibles mediante la estandarización de formatos y código de datos, por lo tanto, IEEE 488.2 define la forma en que los controladores envían órdenes y cómo los instrumentos responden a ellas mediante la especificación de un conjunto de órdenes comunes para todos los instrumentos. Al mismo tiempo, en el área militar, esta especificación se incorporó al programa de pruebas de equipo automatizadas modularmente (MATE, *Modular Automated Test Equipment*) [12].

Paralelamente a los avances en el desarrollo de sistemas ATE compatibles, se realizaron esfuerzos para aumentar la capacidad de procesamiento de los instrumentos GPIB y la velocidad de transferencias en el bus, hasta 1 MBps.

Años después, y como respaldo del estándar obtenido, se formó un consorcio de empresas fabricantes de instrumentos programables cuya principal aportación ha sido la especificación de órdenes estándares para instrumentos programables (SCPI, *Standard Commands for Programmable Instruments*), la cual define un conjunto de órdenes de programación para instrumentos de diferentes fabricantes. Las SCPI especifican el procedimiento para el intercambio de mensajes, el formato de datos y el modelo de reporte de estados, la Figura 4 muestra la relación entre los estándares IEEE 488.

FIGURA 4. RELACIÓN ENTRE LOS ESTÁNDARES IEEE 488.1, IEEE 488.2 Y SCPI.

Formato de intercambio de datos	SCPI
Conjunto de órdenes normalizadas	
Consulta de estados	IEEE 488.2
Órdenes comunes a distintos instrumentos	
Estructura de datos y sintaxis	
Protocolo de intercambio de mensajes	
Secuencias de control	IEEE 488.1
Especificaciones mecánicas, eléctricas y de funciones básicas	

La evolución del GPIB fue la base para que otras arquitecturas lograran su estandarización, por ejemplo VXI, basado en el bus VME, es una arquitectura de instrumentos modulares implementados en tarjetas que se insertan en un chasis, este sistema de instrumentación alcanza velocidades de hasta 40 MBps [13] y está respaldado por el consorcio VXI. El estudio de GPIB y VXI ha alcanzado una enorme expansión permitiendo el diseño de complejos sistemas ATE implementados en diversas plataformas de computadoras bajo diferentes sistemas operativos.

En el año 1990 fueron adoptadas las propuestas SCPI e IEEE 488.2 como estándares de compatibilidad entre instrumentos GPIB e instrumentos modulares en tarjetas VXI.

Debido a la amplia utilización y a los avances tecnológicos respecto al GPIB, en 1993 la compañía National Instruments presentó la especificación HS 488 (*High Speed 488*) destinada a conseguir una velocidad máxima de 8 MBps compatible con el conjunto de especificaciones del estándar IEEE 488. En el mismo año, IEEE adoptó al bus VXI bajo el estándar IEEE 1551.

Dentro de las soluciones software destinadas al diseño de sistemas ATE bajo el GPIB, cabe destacar NI-488.2, desarrollado por National Instruments, que soporta 20 plataformas de computadoras y más de 25 sistemas operativos diferentes, proporcionando gran flexibilidad para la adaptación de aplicaciones y sistemas operativos. También incrementa la productividad y asegura la compatibilidad con los lenguajes de programación modernos al combinar un conjunto de herramientas para aplicaciones en tiempo real y de alto desempeño mediante la utilización de controladores (*drivers*) para núcleos (*kernel*) de 32-bit destinados a sistemas operativos de Win32 (Windows 2000/NT/XP/Me/9x) y otras versiones como pueden ser Windows 3.1, MS-DOS, Solaris, Unix, OS/2, etc. [14, 15].

Además, con la aparición del software NI-488.2 [16, 17], se pueden obtener GUIs amigables, flexibles, portables y aplicaciones GPIB distribuidas. Es oportuno hacer mención que a pesar de que el GPIB alcanzó la estandarización hace más de dos décadas, su amplia utilización ha mantenido actualizadas sus aplicaciones, ejemplo de ello es la continua mejora que sufre NI-488.2 para adaptarse a los avances tecnológicos de la instrumentación electrónica; además de las constantes herramientas hardware de conversión a otros protocolos de comunicación como son:

- *PCI (Peripheral Communications Interconnect Local Bus)*: una interfaz PCI provee de una conexión interna de alta velocidad entre los dispositivos interconectados a una computadora, es la interfaz más utilizada para la conexión de sistemas de adquisición de datos basados en plataformas de PC.
- *PXI/CompactPCI (PCI eXtensions for Instrumentation)*: se refiere a las especificaciones basadas en plataformas de computadoras destinadas a la medida y automatización de sistemas. Combinan su diseño hardware con un conjunto de herramientas de desarrollo para aplicaciones GPIB permitiendo mayores velocidades de conexión interna [18].
- *PCMCIA (Personal Computer Memory Card International Association)*: es una interfaz para computadoras portátiles que incorpora un controlador PCMCIA-GPIB y un analizador GPIB para dar una solución eficiente sin comprometer la flexibilidad y la potencia de procesamiento.
- *ISA (Industry Standard Architecture)*: representa una alternativa de comunicación GPIB y permite la conexión interna de dispositivos GPIB con altas velocidades de transferencia. Es compatible con una gran cantidad de sistemas, hardware y software, que implementan el GPIB.
- *USB (Universal Serial Bus)*: es un protocolo ideal para aplicaciones con ranuras de entrada/salida limitadas, por ejemplo computadoras portátiles.

La arquitectura para sistemas de instrumentación virtual (VISA, *Virtual Instrumentation Systems Architecture*) se basa en un controlador software desarrollado por la firma National Instruments para unificar el software para instrumentación electrónica programable y virtual. VISA es un conjunto de bibliotecas (*libraries*) destinadas a configurar, programar y controlar instrumentos bajo arquitecturas *VXIplug&play*, VXI, VME, PXI, GPIB, RS-232. VISA ayuda al rápido desarrollo de sistemas de instrumentación industriales y permite la reutilización del software.

La firma National Instruments creó en 1998 la línea de dispositivos de instrumentación virtual, conocidos como instrumentos virtuales intercambiables (IVI, *Interchangeable Virtual Instruments*), que en la actualidad se encuentra en proceso de estandarización respaldado por la fundación IVI (*IVI Foundation*) [19, 20]. Dichos dispositivos soportan las características

VXIplug&play, SCPI e incorporan nuevas soluciones al desarrollo de sistemas complejos. Además, ofrece gran flexibilidad y capacidad para el intercambio de instrumentos entre sistemas mediante funciones de software, lo cual reduce tiempo y costos en el desarrollo de sistemas de instrumentación.

Las interfaces descritas cuentan con distintas combinaciones de hardware y software que les permiten ampliar sus capacidades referentes a la funcionalidad, transmisión de datos, velocidades de transferencia, manejo y operación, para ofrecer una mejor conectividad entre sistemas de instrumentación.

Generalmente, el desarrollo de aplicaciones en un entorno de instrumentación programable, basado en algún protocolo de comunicaciones como GPIB o VXI, se lleva a cabo mediante herramientas software propietarias, ejemplo de ello son: la herramienta VEE (*Visual Engineering Environment*) de la firma Agilent Technologies [21] y las herramientas LabView y LabWindows de National Instruments [22], herramientas con un gran respaldo matemático y funciones prediseñadas que facilitan el diseño de GUIs destinadas al control y programación de los instrumentos.

La libertad con la que cuenta el programador de sistemas se ha obtenido de la propia estandarización de los protocolos, resultado de ello son las bibliotecas, controladores, etc., que los fabricantes proporcionan al usuario para utilizarse junto a lenguajes de programación de alto nivel, como C++, Visual C++, etc., para el desarrollo de aplicaciones de usuario.

En la actualidad, los fabricantes de instrumentos electrónicos programables e investigadores se encuentran desarrollando herramientas que mejoren las prestaciones del GPIB en nuevas arquitecturas de instrumentación programable.

3.2. Protocolo de alta velocidad 488 (HS 488)

El constante crecimiento tecnológico e industrial ha originado la aparición de nuevas soluciones en arquitecturas de buses de comunicaciones que permiten alcanzar nuevos niveles de funcionamiento, de ejecución y mayores velocidades de transmisión de datos.

Como se menciona en el Apartado 3.1, la empresa National Instruments ha desarrollado y patentado el protocolo HS 488 con la finalidad de incrementar el rango de transferencia de datos en un sistema GPIB.

El HS 488 consiste en una mejora al estándar IEEE 488 basada particularmente a la versión internacional IEC 625-1 del estándar IEEE 488.1 y su éxito radica, fundamentalmente, en la arquitectura y configuración PCI-GPIB que soportan las PC actuales. El factor clave que aprovecha el protocolo HS 488 para incrementar la velocidad de transferencia de datos es la reducción de tiempo en los ciclos que establece la función de transferencia (*handshake*) del mismo protocolo. Lo anterior se logra de dos formas [23]:

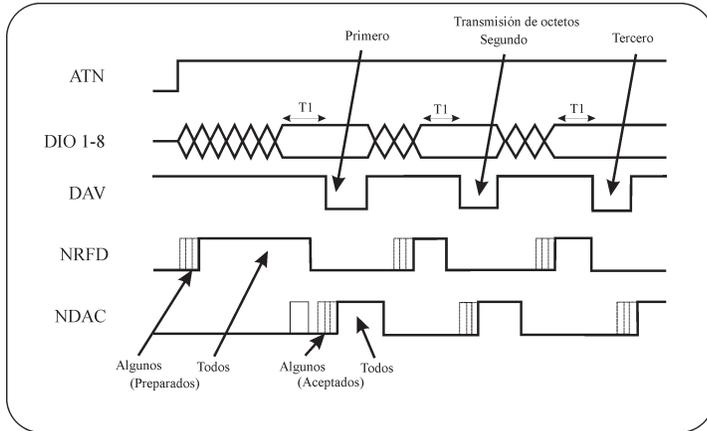
- Al disminuir el número de ciclos de la función de transferencia del dispositivo receptor, el cual almacena del tiempo de procesamiento.
- Al reducir los tiempos para poner y validar el octeto de datos en la línea de datos DIO.

Las principales características del protocolo HS 488 son [24]:

- HS 488 incrementa la transferencia de datos GPIB de 1 MBps a 8 MBps utilizando cables GPIB estandarizados.
- Los dispositivos HS 488 pueden coexistir con dispositivos GPIB en sistemas ATE.
- El protocolo HS 488 es compatible con el protocolo IEEE 488, es decir, en una configuración HS 488 los dispositivos involucrados deben utilizar el protocolo HS 488, pero si un dispositivo de la misma configuración no soporta dicho protocolo, la configuración se adapta automáticamente al protocolo IEEE 488.1 para proporcionarle compatibilidad.
- Un controlador HS 488 utiliza las 3 líneas de la función de transferencia del estándar IEEE 488.1 para emitir órdenes GPIB.
- HS 488 reduce la lectura de parámetros para disminuir los tiempos en el ciclo de transferencia de datos.
- HS 488 incrementa el rendimiento del sistema de procesamiento al eliminar el retardo de propagación de las 3 líneas de la función de transferencia del estándar IEEE 488.1.

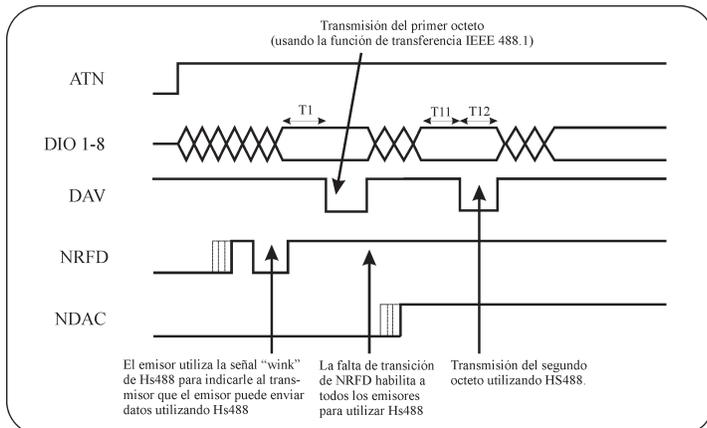
Para entender el incremento en la transferencia de datos que incorpora HS 488, a continuación se describen las funciones de transferencia que implementan ambos protocolos. La función de transferencia de datos del protocolo IEEE 488.1 (Figura 5) realiza los siguientes pasos:

FIGURA 5. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL PROTOCOLO IEEE 488.1.



1. El dispositivo emisor lee las líneas del bus y verifica la presencia de datos.
2. Todos los receptores están listos para recibir datos, cada uno de ellos habilita la línea NRFD.
3. El emisor deshabilita la línea DAV para validar los datos en el bus.
4. Los receptores aceptan el primer octeto de datos y deshabilitan la línea NRFD para indicar que no están listos para recibir el siguiente octeto.
5. Cuando el receptor más lento recibe y acepta el octeto de datos, habilita la línea NDAC indicando con ello que todos los receptores en el bus han aceptado dicho octeto.
6. El emisor necesita un tiempo $T1$ para poner el octeto de datos antes de habilitar la línea DAV.
7. Se deshabilita la línea DAV para indicar que el octeto de datos en el bus ya no es válido.
8. Se deshabilita la línea NDAC y los receptores se preparan para recibir el próximo octeto de datos.
9. Se habilita NRFD y se repite el ciclo.

FIGURA 6. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL PROTOCOLO HS 488.



Por otro lado, el protocolo HS 488 realiza el siguiente procedimiento (Figura 6) en cada ciclo de transferencia de datos:

1. El emisor habilita la línea NRFD después de que el controlador direcciona a todos los receptores.
2. Si un receptor soporta el protocolo HS 488, se utiliza la función de transferencia HS 488.
3. Una vez activado el HS 488, el emisor pone un octeto de datos en la línea de datos DIO.
4. Al habilitar DAV se validan los datos en el bus, al deshabilitarla se puede poner un nuevo octeto de datos.
5. El receptor deshabilita NDAC y tiene un tiempo determinado para aceptar el octeto de datos.

El emisor necesita un tiempo ($T1$ en la emisión del primer octeto y $Tn1$ en la emisión de los siguientes octetos) para poner el octeto de datos en el bus y un tiempo ($Tn2$ para el n octeto) para validarlo, dichos tiempos pueden ser configurados por los usuarios y dependen de la longitud del cable y del número de dispositivos del sistema HS 488.

TABLA 2. COMPARACIÓN ENTRE LOS PROTOCOLOS IEEE 488.1 Y HS 488.

Concepto	IEEE 488.1	HS 488
Propuesta	Hewlett Packard	National Instruments
Año	1975	1993
Estándar	IEEE 488/IEC 625	Sin estandarización
No. de instrumentos activos	15	15
Máx. velocidad de transferencia (15 m)	1 MBps	8 MBps
Máx. velocidad de transferencia (20 m)	500 KBps	1.5 MBps
Sistemas empotrados controladores de bus	Abierto	Propietario
Compatibilidad IEEE 488/HS 488	Ninguna	Soporta IEEE 488.1
Productos en el mercado	Muchos	Pocos

4. Conclusiones

El gran avance tecnológico que ha sufrido el campo de la instrumentación electrónica programable y virtual ha dado origen a un gran número de arquitecturas, estándares y soluciones software para incrementar la potencialidad en la adquisición, procesamiento y presentación de los resultados en entornos industriales, mediante el diseño de sistemas de instrumentación complejos.

A pesar de dicho avance, el protocolo de comunicaciones con mayor demanda es el GPIB, debido principalmente a la gran diversidad de soluciones hardware y software en el mercado, al conocimiento del protocolo de comunicaciones y al respaldo que le representa su estandarización. La mejora propuesta por National

Instruments, incrementa la velocidad de transferencia basándose en la versión original del estándar (IEEE 488.1) pero carece aún de soluciones abiertas para interfazar dispositivos HS 488 con los ya realizados e implementados en los sistemas en funcionamiento.

La tendencia actual es crear sistemas móviles o reutilizables bajo diversas plataformas o arquitecturas como VXI, CompactPCI o USB, lo cual facilita en gran medida la creación de sistemas ATE en tiempo y costos. Tales diseños requieren de un amplio conocimiento, el cual inicia con los requerimientos del sistema a desarrollar, las soluciones hardware en cuanto a los protocolos de comunicaciones y las soluciones software disponibles, estas últimas requieren especial atención debido a que son las que facilitan en gran medida el tiempo de diseño y la verificación del sistema.

La Universidad Tecnológica de la Mixteca cuenta dentro de los Laboratorios Avanzados de Electrónica con el Laboratorio de Comunicaciones Digitales (Lab-CD), el cual está conformado por 11 estaciones de trabajo, todas ellas se comunican con los instrumentos de medida y estimulación mediante GPIB 

Bibliografía

- [1] MARIÑO, P., NOGUEIRA, J. Y HERNÁNDEZ, H.
1999 Programmable Instrumentation Laboratory for Testing of Electronic Circuits and GPIB's Signal Analysis. Proceedings of the IASTED International Conference on Computers and Advanced Technology in Education, CATE'99, pp. 167-171, Philadelphia, Pennsylvania (USA), May 6-8.
- [2] HELFRICK, A. Y COOPER, W.
1991 Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medición. Prentice Hall.
- [3] MANDADO, E. MARIÑO, P. Y LAGO, A.
1995 Instrumentación Electrónica. Marcombo.
- [4] MARIÑO, P., NOGUEIRA, J. Y HERNÁNDEZ, H.
1999 Training on Programmable Instrumentation for a curriculum of Electronic Engineering. Proceedings of the 2nd International Conference in Recent Advances in Mechatronics. ICRAM'99. Estambul (Turquía). May 24-26.
- [5] MARIÑO, P., NOGUEIRA, J. & HERNÁNDEZ, H.
1999 Electronics Laboratory Practices based on Virtual Instrumentation. Proceedings of the FIE '99, ASEE/IEEE, vol. 12, pp. 6-10, San Juan (Puerto Rico), November 10-13.
- [6] HERNÁNDEZ, H.
1996 ADS, Analizador Dinámico de Señales. Universidad Tecnológica de la Mixteca, Tesis de Licenciatura.
- [7] MARIÑO, P., NOGUEIRA, J. Y HERNÁNDEZ, H.
2000 Laboratorio de Instrumentación Programable para prueba de circuitos electrónicos y análisis de señales de bus GPIB. Revista TEMAS, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Vol. 4, pp. 29-36, México.
- [8] GONZÁLEZ, A.
2003 Estudio del protocolo IEEE 488 mediante el desarrollo de una herramienta de simulación. Universidad Tecnológica de la Mixteca, Tesis de Licenciatura.
- [9] ANSI/IEEE Std 488-1978
1983 Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation. ANSI/IEEE Std 488-1978. IEEE Std 728-1982. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [10] MARIÑO, P.
2003 Las comunicaciones en la Empresa; Normas, redes y servicios. RA-MA Editorial, 2ª edición.

- [11] CARISTI, A.
1989 IEEE-488 General Purpose Instrumentation Bus Manual. Academic Press.
- [12] MARIÑO, P., NOGUEIRA, J. & HERNÁNDEZ, H.
2000 Laboratory of Virtual Instrumentation for Industrial Electronics. Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT'2000, Goa (India), January 19-22.
- [13] BLACK, J.
1992 The system engineer handbook, a guide to building VMEbus and VXIbus systems. Academic Press.
- [14] AGILENT TECHNOLOGIES
2001 Test & Measurement; Catalog 2001. Agilent technologies Corp.
- [15] NATIONAL INSTRUMENTS
2003 The Measurement and Automation Catalog 2003. National Instruments Corp.
- [16] NATIONAL INSTRUMENTS
1999 NI-488.2™ GPIB Analyzer User Manual. National Instruments Corp.
- [17] NATIONAL INSTRUMENTS
1999 NI-4882™ User Manual for Windows. National Instruments Corp.
- [18] NATIONAL INSTRUMENTS
1997 PXI Specification, PCI eXtensions for Instrumentation an Implemanentation of CompactPCI. National Instrument Corp. Revision 1.0, august 20.
- [19] <http://www.ni.com>, Página principal de la firma National Instruments.
- [20] <http://www.ivifoundation.org>, Página principal de la fundación IVI.
- [21] HELSEL, R.
1998 Visual Programming with HP VEE. Hewlett Packard Professional Books, third edition, 1998.
- [22] LÁZARO, A.
2001 LabVIEW 6i, Programación Gráfica para el Control de Instrumentación. Paraninfo-Thomson Learning.
- [23] PIEPER, J.
The High Speed 488 extensions to GPIB, a critical evaluation of the proponed higher performance protocol. ACEA, Wierden, The Netherlands.
- [24] PIEPER, J.
488, The consequences. ACEA, Wierden, The Netherlands.

Heriberto I. Hernández Martínez,
Ángel F. González Hernández
y Josué N. García Matías
Instituto de Electrónica y Computación,
Universidad Tecnológica de la Mixteca.