

# DISEÑO DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES INDUSTRIALES PARA SU USO EN LA ENSEÑANZA

*Miguel Ángel Domínguez<sup>1</sup>, Francisco Poza<sup>2</sup>, Perfecto Mariño<sup>3</sup>, Heriberto Hernández<sup>4</sup> y  
Fernando Machado<sup>5</sup>*

<sup>1</sup>*Universidad de Vigo, Departamento Tecnología Electrónica. mdgomez@uvigo.es*

<sup>2</sup>*Universidad de Vigo, Departamento de Tecnología Electrónica. fpoza@uvigo.es*

<sup>3</sup>*Universidad de Vigo, Departamento de Tecnología Electrónica. pmarino@uvigo.es*

<sup>4</sup>*Universidad Tecnológica de Mixteca (México). hhdez@mixteco.utm.mx*

<sup>5</sup>*Universidad de Vigo, Departamento de Tecnología Electrónica. fmachado@uvigo.es*

## RESUMEN

Las redes de comunicaciones industriales o buses de campo han experimentado un gran auge en los últimos años debido a la complejidad alcanzada por los sistemas de automatización en diversos ámbitos y sectores (control industrial, automoción, aeronaves, barcos, domótica). Por lo tanto es interesante e imprescindible la utilización de sistemas de iniciación y aprendizaje que pueden ser aplicados en la enseñanza de carreras técnicas para que sus alumnos adquieran un conocimiento práctico sobre los diferentes protocolos existentes en el mercado. En este artículo se describe el diseño de diferentes dispositivos que conforman sistemas de iniciación y aprendizaje con aplicación en la enseñanza del protocolo CAN (Controller Area Network), que es uno de los protocolos más utilizados en aplicaciones en el sector de la industria automovilística.

## 1. INTRODUCCIÓN

La automatización de procesos de fabricación industriales ha originado la necesidad de nuevas tecnologías en los sistemas de comunicación existentes entre las unidades de proceso (PCs, Automatas, controladores, máquinas de cálculo numérico, etc.) y los dispositivos de campo (sensores y actuadores). En un principio las interconexiones se realizaban punto a punto. Esta solución tiene una serie de problemas como son un exceso de cableado, instalaciones complejas, difícil escalabilidad y complicado diagnóstico y corrección de fallos o errores. Estos problemas fueron solucionados en gran medida con la aparición de los buses de campo (fieldbuses) [11].

La IEC (International Electrotechnical Commission) y la ISA (Instrument Society of America) definen a los buses de campo como redes de datos serie, digitales y múltiples puntos de conexión que sirven para comunicar elementos de control industrial de bajo nivel y dispositivos de instrumentación tales como sensores, actuadores y controladores locales.

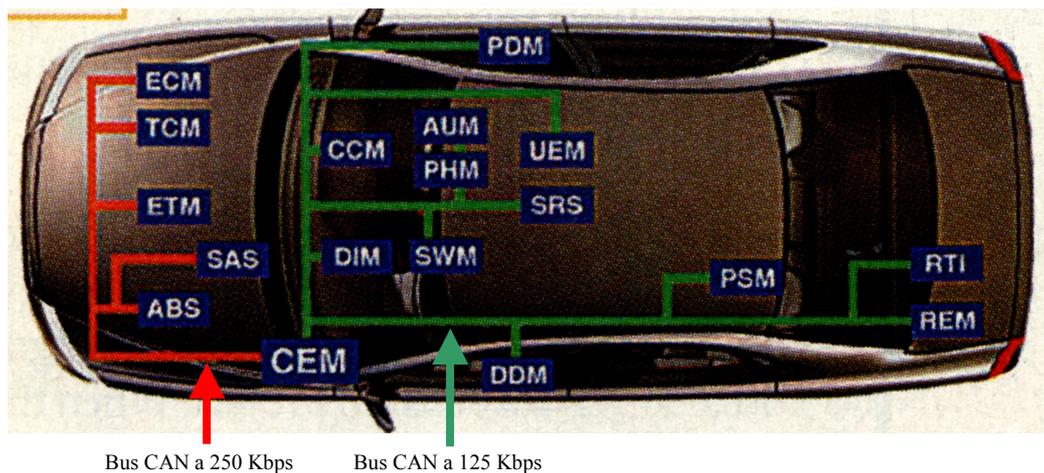
Los buses de campo permiten transferencias de información en serie y están orientados a la transmisión de datos en el ámbito industrial, tanto en los procesos discretos (automóvil, alimentación, bienes de equipo, electrodomésticos, etc.) como en los continuos (petroquímicas, electroquímicas, metalurgia, electricidad, agua, gas, etc.), e incluso en los incorporados a productos de la industria automovilística (motores de explosión, transmisión, climatización, seguridad, confortabilidad, etc.). Esto da lugar a una gran variedad de buses de campo que van desde los propietarios hasta los normalizados por alguna organización internacional (ISO, ITU, IEEE, etc.) [10]. En las Tablas 1 y 2 se presentan algunos de los protocolos más importantes con información sobre el organismo o fabricante que los propuso, la norma que los recoge (si es el caso) y el sector donde se utilizan principalmente [2].

Nombre	Propuesta	Norma	Aplicación
P-NET	Industria (Dinamarca)	CENELEC EN 50170 Vol. 1	Control industrial
PROFIBUS	Industria (Alemania)	CENELEC EN 50170 Vol. 2, DIN STD 19245	
WorldFIP	Industria (Francia)	CENELEC EN 50170 Vol. 3, NFC 46 601+605	
HART	Rosemount y Fisher	IEC TC65 (DDL: Description Device Language)	
SP50 Fieldbus	IEC/ISA	ANSI 850/IEC 1158	
Foundation Fieldbus	ISP y WorldFIP	ISA SP50/IEC TC65	
MODULINK	Weidmüller (Alemania)		
Modbus	Modicon (USA)		
PROWAY	IEC		
TIWAY	Texas Instrument		
SINEC L1	Siemens		
Interbus-S	Phoenix (Alemania)	DIN E19258	
DataHighway	Allen Bradley		
EPA/MiniMAP	General Motors (USA)	(MMS) EIA RS-511, ISO 9506	
Bitbus	Intel	IEEE 1118	
Genius I/O	Gen. Electric (USA) y Fanuc (Japón)		
Measurement Bus	Industria (Alemania)	DIN 66348	
CC-Link	Mitsubishi Electric (Japón)		
MMS-ATM	Lab. Logiciels, Systèmes, Réseaux-IMAG (Francia)		
CAN	Bosch (Alemania) y CiA	ISO 11898/11519	
UART-9141	Europa (Diagnóstico)	ISO 9141	
SDS	Honeywell	ISO 11989 (basado en CAN)	
DeviceNet	Allen Bradley (Rockwell)	ISO 11898 y 11519 (basado en CAN)	
ControlNet		Basado en CAN	
OSEK/VDX	Universidad de Karlsruhe	Define aplicaciones para VAN and CAN	
VAN	Renault-PSA		
SERCOS	USA	IEC 61491	
SENSOPLEX	Ford (California)		
J1850	SAE (Diagnóstico) USA		
J1939	SAE	Basado en CAN	
MI Bus	Motorola		
ABUS	Volkswagen		
Compobus/S	Omron		
SERIPLEX	APC (USA)		Sensores y actuadores
AS-I	Siemens	IEC 1131-3	
RACKBUS			
NBIP	Intel		Microcontroladores
MIL-STD 1553B	DOD (USA)	Gobierno USA y otros (OTAN)	Aeronaves
M3S	Instituciones (Europa)	ISO/TC173/SC1/WG7	Sillas de ruedas
MITS	Research Council (Noruega)	IEC TC80/WG6	Barcos

Tabla 1. Buses de campo para aplicaciones industriales.

Nombre	Propuesta	Norma	Características
LonWorks	Echelon y Apple (USA)	EIA-709	Líder en USA
CEBus	Industria (USA)	EIA-IS-600	Multimedia
HBS	EIAJ (Japón)		
HBES	Industria (Europa)	CENELEC EN 50090-2-1	
Firewire	Texas Instruments y Apple	IEEE 1394	Multimedia y alta velocidad (400 Mbps)
BatiBus	Merlin Gerin y Schneider Electric	Grupo de trabajo CENELEC TC105	Consorcio europeo HBES
EHS	Philips y otros		
EIB	Siemens		
FOBUS	EIA (USA)	Basado en CEBus para fibra óptica	Compatible RDSI
ARCNET	Datapoint Corporation	ANSI 878	Paso de testigo
Smart House	Empresas (USA)		
SR Bus			Infrarrojos (IR)
MIB			Hospitales
TRON	Japón		Edificios
BHAS	Universidad de Miami	Basado en CEBus para par trenzado	
Home Minder	General Electric		
HAS	Mitsubishi		
PAH	Thorn-EMI		
MF-20	Nippon Interphones		Enlace a red telefónica
BACnet	ASHRAE	ASHRAE Std. 135-1995	
CABNET	Canadá		
X10	USA y Canadá		Uso de tomas eléctricas
M-Bus	Univ. Paderborn (Alemania), Texas Instr. y Techem	IEC 870 y EN 1434-3	Medidores y contadores

Tabla 2. Principales protocolos utilizados en sistemas de automatización residencial y de edificios (domótica).



ABS: Sistema de frenado antibloqueo, ECM: Gestión de control del motor, ETM: Control electrónico de la transmisión, SAS: Sensor de ángulo de la dirección, TCM: Gestión control de acelerador, CEM: Módulo electrónico central (pasarela), AUM: Módulo de audio, CCM: Módulo de control de climatizador, DDM: Módulo puerta del conductor, PDM: Módulo puerta pasajero, PHM: Módulo de teléfono, PSM: Módulo de control de asientos, REM: Módulo electrónico trasero, RTI: Información tráfico en carretera, SRS: Sistema de control de la seguridad, SWM: Módulo del volante, UEM: Módulo electrónico superior.

Figura 1. Red CAN que comunica las 18 unidades de control electrónico presentes en el Volvo S80 [8].

## 2. EL PROTOCOLO CAN

### 2.1. Introducción

Hoy en día los automóviles están cada vez más dotados de dispositivos electrónicos que facilitan la conducción y mejoran la seguridad y el confort del vehículo (suspensiones activas, control de estabilidad electrónico, sistemas de ayuda a la frenada, control de cambio de marchas, control de luces, climatización, airbag, cierre centralizado, etc.). Esto implica que es necesario un intercambio de información entre los diferentes sistemas de control y los sensores y actuadores que sea fiable y en tiempo real. Con el aumento del número y la complejidad de los sistemas electrónicos en los automóviles, es imposible realizar dicho intercambio de información mediante conexiones punto a punto (longitud de cable desmesurada, aumento de costes y tiempo de producción, problemas de fiabilidad, etc.). Por lo tanto es necesaria la aplicación de una red de comunicaciones industriales o bus de campo.

CAN (Controller Area Network) es un protocolo de comunicaciones industriales serie que inicialmente fue pensado para su uso en vehículos de motor. La firma alemana Bosch lo desarrolló y patentó en los años 80 [1]. Este bus de campo soporta eficientemente el control de sistemas distribuidos. CAN está internacionalmente reconocido y ha sido normalizado por la ISO (International Organization for Standardization) y la SAE (Society of Automotive Engineers). Además ha sido el protocolo más utilizado en el sector del automóvil donde las unidades de control, sensores, sistemas de antideslizamiento y otros sistemas a bordo del vehículo se conectan a velocidades de hasta 1 Mbps (Figura 1). El protocolo CAN también tiene una amplia aplicación en las áreas de la automatización industrial, control de máquinas y aplicaciones marítimas y ferroviarias. La aceptación del protocolo CAN es tan grande que ha servido de inspiración para el desarrollo de otros buses de campo como por ejemplo: VAN (Vehicle Area Network) creado por Renault y el grupo PSA; DeviceNet y ControlNet desarrollados inicialmente por Allen-Bradley en los años 1994 y 1995 respectivamente; SDS (Smart Distributed System) desarrollado por Honeywell; J1939 propuesto por la SAE y el protocolo M3S (Múltiple Master Múltiple Slave) cuya principal aplicación es en las sillas de ruedas electrónicas para minusválidos.

## 2.2. Cronología y normalización

A comienzos de los años 80 los ingenieros de Bosch valoraron los protocolos de buses de campo existentes en aquellos momentos para implantarlos en los automóviles. Llegaron a la conclusión de que ninguno de los protocolos cumplían al completo sus requerimientos y decidieron diseñar y desarrollar un nuevo sistema de comunicaciones industriales en el año 1983. La persona encargada de este proyecto fue Uwe Kiencke.

En febrero de 1986, Uwe Kiencke, Siegfried Dais y Martín Litschel presentaron en el congreso de la SAE (Society of Automotive Engineers) la primera versión del protocolo con la suficiente funcionalidad para su aplicación en los automóviles. CAN había nacido oficialmente.

En 1987 apareció el primer controlador CAN. Este circuito integrado fue fabricado por Intel (circuito integrado 82526) y Philips Semiconductors (circuito integrado 82C200). Cuatro años más tarde, en Septiembre de 1991, Bosch publica la especificación CAN 2.0. En este mismo año Kvaser presenta el CAN Kingdom que es un protocolo de alto nivel (capa de aplicación) basado en las capas física y de enlace de datos de CAN.

A comienzos de los años 90 empezaron los primeros intentos para formar un grupo de usuarios cuyo objetivo era establecer una plataforma neutral para el desarrollo técnico y comercialización del protocolo CAN. El resultado fue la fundación oficial de el grupo de usuarios CiA (CAN in Automation) en marzo de 1992 que fue promovida por Holger Zeltwanger. Pocos meses más tarde, CiA publicó el primer documento donde se describía la capa física del protocolo y se recomendaba el uso de transmisores-receptores CAN que cumplieran la norma ISO 11898 [6]. Uno de los primeros logros de CiA fue la especificación de la capa de aplicación de CAN que se denominó CAL. Esta capa de aplicación se desarrollo a partir de trabajos anteriores de “Philips Medical Systems” y fue publicada en el conocido como “libro verde”. Otros logros de CiA fue facilitar el intercambio de información entre las personas y empresas con interés en el protocolo CAN mediante la organización de una conferencia internacional sobre CAN (iCC) que se viene celebrando desde el año 1994. La organización CiA define cuatro áreas de aplicación del protocolo CAN: industria automotriz, automatización industrial, control de máquinas y aplicaciones marítimas y ferroviarias

En 1992 la empresa Mercedes-Benz fabricó los primeros automóviles que utilizaron el bus CAN. En noviembre de 1993 se publicó la norma ISO 11898 [6]. Se define una capa física que puede alcanzar velocidades de transmisión de hasta 1 Mbps. Además transmisores CAN con tolerancia a fallos se definen en la norma ISO 11519-2 [7].

En 1995 se publica una corrección de la norma ISO 11898 y la organización CiA publica el protocolo CANopen. Este protocolo fue desarrollado por Bosch con un perfil basado en CAL. Fue pensado para su uso como red interna de comunicación de las máquinas de control presentes en las células de producción. CANopen consiguió convertirse en la red normalizada más importante en Europa en tan solo cinco años.

En el año 2000 se define y desarrolla el protocolo de comunicaciones en tiempo real para CAN denominado TTCAN (Time-Triggered communication of CAN). Fue desarrollado por Bernd Mueller y Tomas Fuehrer junto con otros expertos de la industria de semiconductores (ingenieros de Bosch).

CAN se recoge como norma en la ISO 11898/11519 [6] [7]. Considerando el modelo de referencia OSI (Open Systems Interconnection) de la ISO (International Organization for Standardization), el bus CAN define una arquitectura de protocolos con tres capas principales y una capa especial para gestión y control del nodo:

- Capa física: Especifica los parámetros eléctricos, mecánicos, funcionales y de procedimiento. Se encarga de la codificación/decodificación de los datos a

transmitir/recibir en el medio físico y de la sincronización y temporización de bit. Esta capa se recoge en la norma ISO 11898-2 para aplicaciones de alta velocidad y en la ISO 11898-3 para aplicaciones tolerantes a fallos.

- Capa de enlace de datos: Regula la transmisión de datos entre nodos de una red CAN y se encarga de construir las tramas. Esta capa se define en la norma ISO 11898-1.
- Capa de aplicación: Proporciona las funciones básicas para dar acceso a la red a los usuarios o procesos de aplicación. Existen varias soluciones normalizadas que dependen de las aplicaciones y de su entorno geográfico, entre las que destacan CANopen, DeviceNet y J1939.
- Capa de gestión y control: Para satisfacer algunas necesidades de la misma aplicación como por ejemplo configuración del modo de operación y de la velocidad de transmisión, informe de errores, etc.

### 2.3. Principales características

Las principales características del protocolo CAN son las siguientes [5]:

- Prioridad de mensajes.
- Distancias de 40 metros para velocidades altas (1 Mbps) y de 1000 metros para velocidades bajas (50 Kbps).
- Número máximo de nodos de 64 para 1 Mbps y de 127 para 50 Kbps.
- Codificación de los bits a nivel físico en formato NRZ (Non Return to Zero).
- Recepción múltiple de mensajes con sincronización de tiempos.
- Múltiples estaciones activas (Multimaster). Todas las estaciones son activas.
- Acceso al bus mediante un método CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection) utilizando arbitraje de bit.
- Retransmisión automática de mensajes erróneos tan pronto como el bus queda libre.
- Distinción entre errores temporales y fallos permanentes de los nodos. Desconexión autónoma de los nodos defectuosos.

Ningún nodo hace uso de información sobre la configuración del sistema (direcciones de las estaciones). Las estaciones pueden ser añadidas y eliminadas del bus sin tener que realizar cambios en ninguno de los nodos existentes (flexibilidad del sistema). El contenido de un mensaje está definido por un identificador (11 bits para tramas estándar y 29 bits para tramas extendidas). Los nodos pueden definir mediante un filtrado de mensaje (registro de máscaras) si los datos son para ellos o no. De esta forma puede existir recepción múltiple de un mismo mensaje por varios nodos (multidifusión). El identificador define la prioridad de los mensajes.

Si el bus está libre cualquier nodo puede transmitir un mensaje. Si dos o más estaciones transmiten al mismo tiempo, el conflicto de acceso al bus se resuelve mediante un método de contienda basado en arbitraje de bit, usando para ello el identificador de la trama. El bus puede tener dos posibles valores lógicos: dominante (valor lógico "0") y recesivo (valor lógico "1"). Durante la transmisión simultánea de bits dominante y recesivo, el valor resultante en el bus será dominante. Durante el arbitraje cada transmisor compara el nivel de los bits del campo identificador transmitido con el nivel que se monitoriza en el bus. Si estos niveles son iguales la estación sigue enviando la trama. Pero cuando un nivel recesivo es enviado y se monitoriza un nivel dominante, el nodo para de transmitir inmediatamente la trama. Esto implica que tienen mayor prioridad las tramas con identificador menor ya que el nivel dominante se corresponde a un "0" y el recesivo a un "1". La colisión de los mensajes se evita mediante el control en el medio físico de los bits enviados y sin pérdida de tiempo.

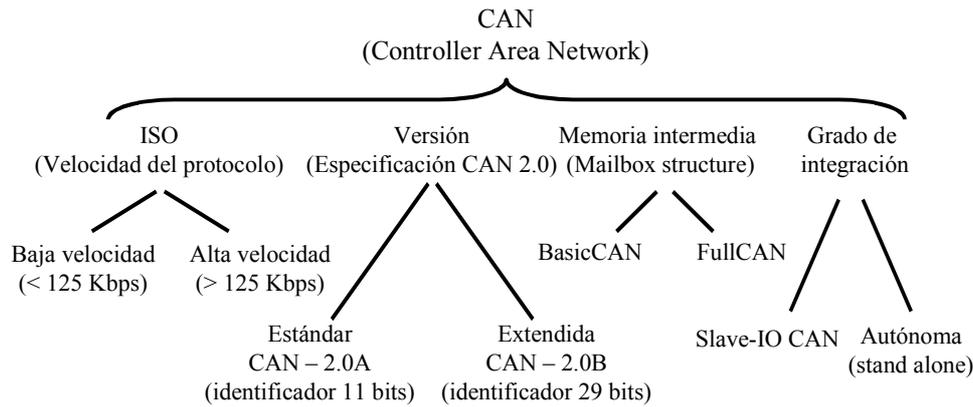


Figura 2. Clasificación de los dispositivos CAN.

## 2.4. Clasificación de los dispositivos CAN

Los protocolos de comunicaciones destinados a aplicaciones en el sector de la automoción son valorados por los fabricantes de semiconductores, organizaciones de normalización y la SAE. Además, los sistemas y dispositivos CAN pueden clasificarse en base a unos criterios determinados como son la clasificación ISO (según su velocidad), la versión del protocolo, la estructura de la memoria intermedia y el grado de integración [3]. En la Figura 2 se muestra una clasificación de los dispositivos CAN según los criterios anteriores.

## 3. SISTEMA DE ENSEÑANZA

### 3.1. Estructura del sistema

En este apartado se describe el diseño y estructura de una red de iniciación a las comunicaciones CAN. Esta red básica de comunicaciones industriales esta formada por una serie de nodos que han sido diseñados y realizados por los autores utilizando diversas tecnologías. La red tiene un fin primordialmente didáctico para que estudiantes o usuarios que deseen iniciarse en el uso de sistemas CAN realicen prácticas sencillas de comunicaciones donde puedan analizar y estudiar todas las tramas y mensajes que son transmitidos por el bus.

En la Figura 3 se muestra la estructura de la red y los nodos que la conforman. Este entorno para aplicaciones de enseñanza está formado por una estación de monitorización (analizador de protocolo), un módulo de control y por una serie de dispositivos que cumplen la norma CAN. En los siguientes subapartados se explican las tecnologías utilizadas para la realización de los diferentes dispositivos y sus funcionalidades. El diseño y desarrollo de nodos CAN tiene como principal objetivo el formar una red CAN para estudiar el protocolo y sus derivados (por ejemplo TTCAN).

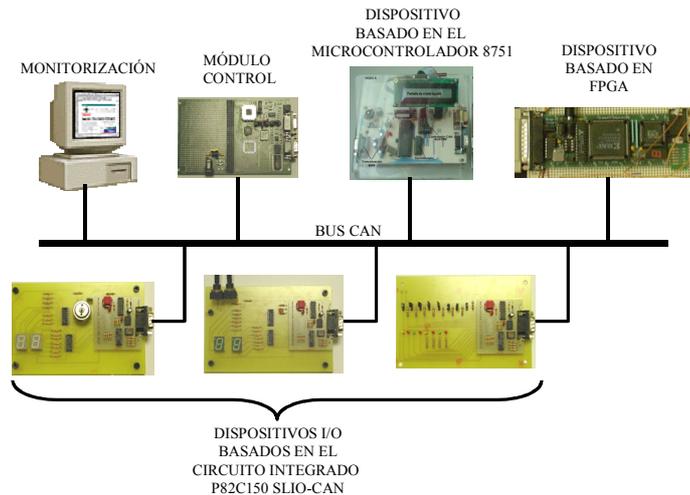


Figura 3. Estructura de la red de iniciación para la enseñanza del protocolo CAN.

### 3.2. Estación de monitorización

La estación de monitorización se encarga de capturar las tramas que circulan por el bus de campo para su posterior análisis. Para ello se utiliza un ordenador personal con una tarjeta CANPCa de alta velocidad de la empresa NSI. En el ordenador se instalan los programas controladores necesarios que permiten el acceso a todas las funcionalidades de la tarjeta CAN. Dicha tarjeta está basada en el controlador CAN 82527 de la empresa Intel, soporta velocidades de transmisión de hasta 1 Mbps y es compatible con las especificaciones CAN 2.0A y 2.0B. Utiliza el transceptor 82C250 de Philips como adaptador de bus.

La aplicación del analizador de protocolo que se ejecuta en este ordenador se realizó en el entorno de programación Borland C++ Builder y se ejecuta en un sistema operativo Windows 2000/NT/9x. En la Figura 4 se puede ver la pantalla que la aplicación del analizador de protocolo presenta al usuario. En ella se ofrece información relativa a las tramas que circulan por la red y se analizan los datos incluidos en los mensajes declarados en estas tramas.

Tipo evento	Estado	Id...	Nombre	Tipo ...	Dlc	Datos	Mensajes	Tiempo	Dif. tiemp.
_TX_DATA	_ACTI...	170	170	_STD	2	AA 04	9275	3958301	50
_TX_DATA	_ACTI...	660	660	_STD	3	03 01 04	6	3617897	25454
_RX_DATA	_ACTI...	661	DESCONO...	_STD	3	03 01 04	6	3617898	25454
_TX_DATA	_ACTI...	644	644	_STD	3	03 00 FF	3	3555646	5898
_RX_DATA	_ACTI...	645	DESCONO...	_STD	3	03 00 FF	3	3555647	5898
_TX_DATA	_ACTI...	676	676	_STD	3	03 03 02	4	3670428	14781
_RX_DATA	_ACTI...	677	DESCONO...	_STD	3	03 03 02	4	3670429	14781

Nom...	Identifica...	Tipo iden...	Tipo datos	Dlc	Datos	StatusRq	In...	A...	Temp...
170	170	_STD	_TX_DA...	2	AA 04	_STATUS	Si	Si	50
660	660	_STD	_TX_DA...	3	03 01 ...	_STATUS	Si	No	No
644	644	_STD	_TX_DA...	3	03 00 ...	_STATUS	Si	No	No
676	676	_STD	_TX_DA...	3	03 03 ...	_STATUS	Si	No	No

Mensajes: 4    Mensajes iniciados: 4    Mensajes activados: 11

Mensajes

(Tarjeta 0)-Se está mandando el identificador: 660  
(Tarjeta 0)-Se está mandando el identificador: 644  
(Tarjeta 0)-Se está mandando el identificador: 676

Tarjetas presentes: 1    Tarjetas activadas: 1    Tarjetas comunicando: 1

Figura 4. Ejemplo de pantalla del analizador de protocolo.

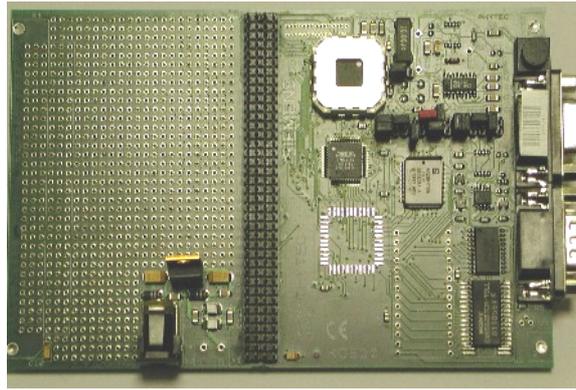


Figura 5. Módulo de control.

### 3.3. Módulo de control

La red de iniciación para comunicación CAN tiene un módulo de control realizado en una tarjeta de circuito impreso que se muestra en la Figura 5. Para realizar este módulo de control se utiliza el microcontrolador SAP 505C de la firma Siemens. Este microcontrolador se programa para que realice las correspondientes peticiones de datos al resto de nodos conectados a la red y gestione la transferencia de datos entre dichos nodos mediante la apropiada conversión de identificadores.

### 3.4. Nodos basados en microcontrolador

En la realización de la red de iniciación para la enseñanza del protocolo CAN que se presenta en este artículo, se han diseñado nodos basados en microcontroladores. Se ha utilizado el microcontrolador 8751 de la familia MCS-51 de Intel como administrador de nodo, el integrado SJA1000 de la compañía Philips como controlador CAN y el tranceptor UC5350N de Texas Instruments para aislar las tensiones del controlador CAN y la línea del bus. La interfaz con el usuario se realiza mediante un programa en MS-DOS que tiene comunicación directa con el microcontrolador 8751 para el envío de mensajes al bus CAN. En la Figura 6 se muestra el diagrama de bloques de estos nodos y en la Figura 7 se puede ver el aspecto físico del diseño de dos nodos.

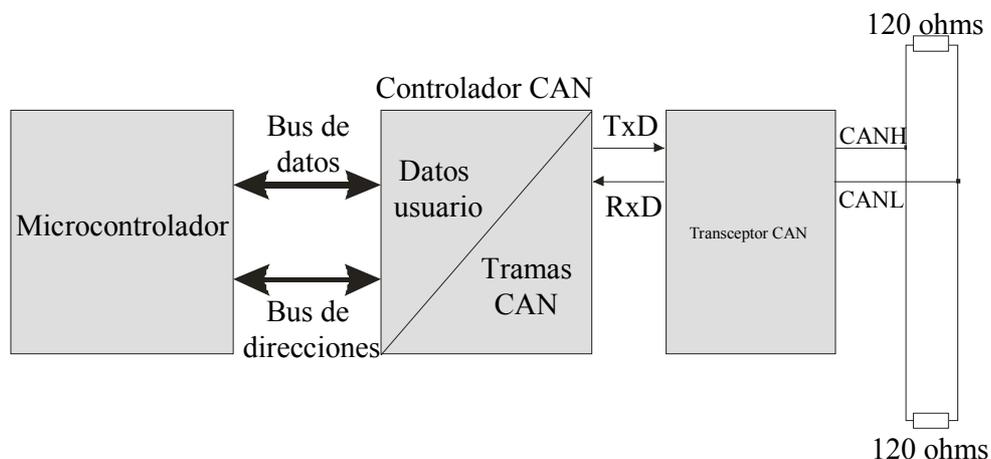


Figura 6. Diagrama de bloques.

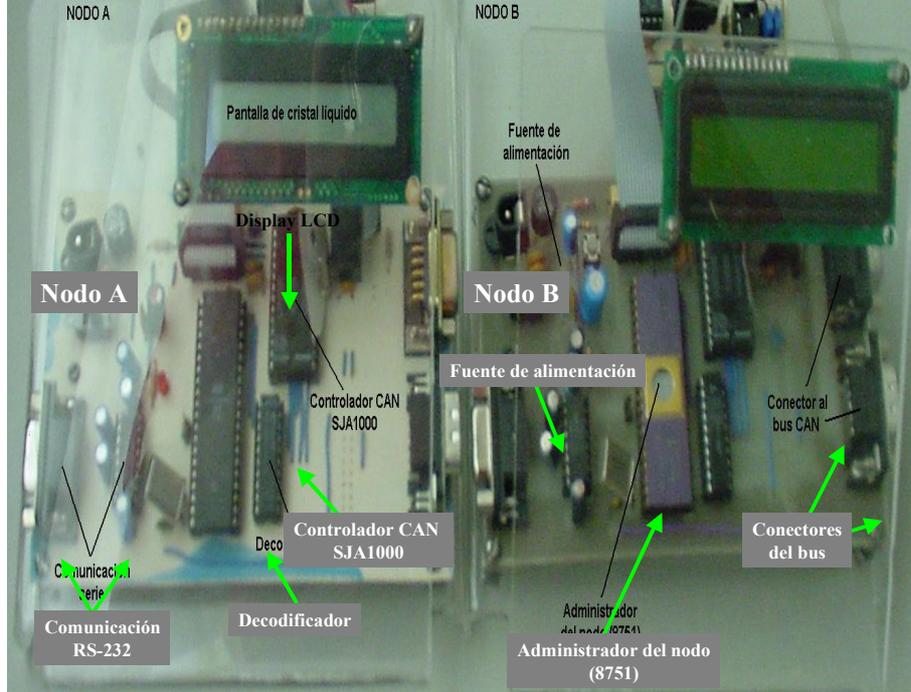


Figura 7. Aspecto físico del diseño de dos nodos.

### 3.5. Nodos basados en el circuito integrado P82C150

También se han diseñado un tipo de nodo CAN realizados en tarjetas de circuito impreso con entradas/salidas digitales y analógicas y que utilizan para la gestión de la comunicación con el bus el circuito integrado P82C150 SLIO-CAN de Philips. La tarjeta de circuito impreso contiene todos los elementos necesarios para la configuración del nodo y conexión al bus. En la Figura 8 se puede ver el módulo de comunicaciones presente en todos los nodos de este tipo y en la Figura 9 se presenta un ejemplo de un nodo de entrada/salida formado por un par displays de 7 segmentos y por un motor de corriente continua.

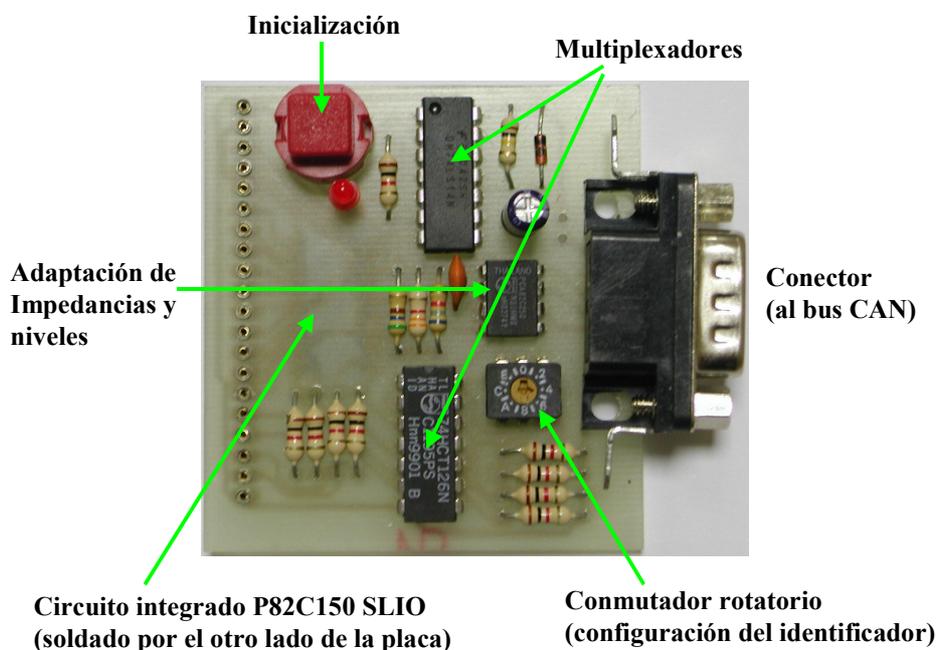


Figura 8. Módulo de comunicación CAN.

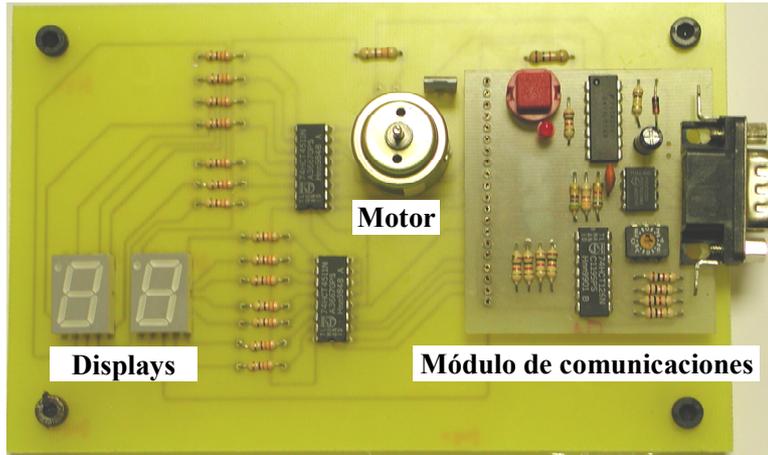


Figura 9. Tarjeta de entrada/salida con comunicación CAN.

### 3.6. Nodos basados en FPGAs

Otro tipo de nodos que se han diseñado para su utilización en la enseñanza están basados en tecnología de dispositivos lógicos programables (PLD: Programmable Logic Devices). La descripción del protocolo se realizó en una matriz de puertas configurable (FPGA: Field Programmable Gate Array) del fabricante Xilinx mediante el lenguaje de descripción hardware VHDL (Very high speed IC Hardware Description Language) con la ayuda de la herramienta Foundation de Xilinx. Para la realización física se utilizó la tarjeta XS40 de la firma Xess Corporation, la cual está compuesta por una FPGA XC4010XL de Xilinx y un microprocesador 8051 de Intel [4].

La Figura 10 muestra el diagrama de bloques de la descripción hardware del protocolo CAN que fue realizada con la ayuda de las herramientas de diseño del software Foundation (diseño de esquemáticos, VHDL y LogiBLOX). La descripción hardware del protocolo CAN tiene la capacidad de adaptación a cualquier FPGA. En la Figura 11 se muestra la realización física de dicho nodo donde se puede ver la tarjeta con la FPGA, las conexiones con el bus y con el ordenador de programación y un display que se utiliza como interfaz de usuario.

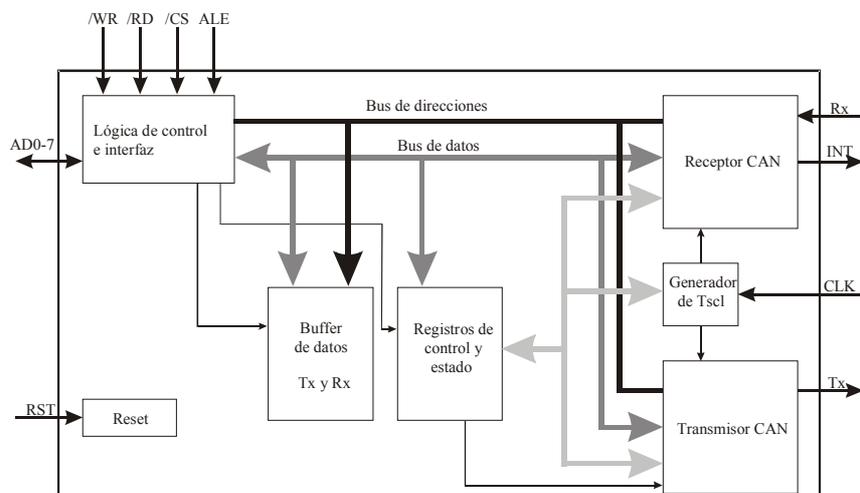


Figura 10. Diagrama de bloques de la descripción hardware del protocolo CAN.

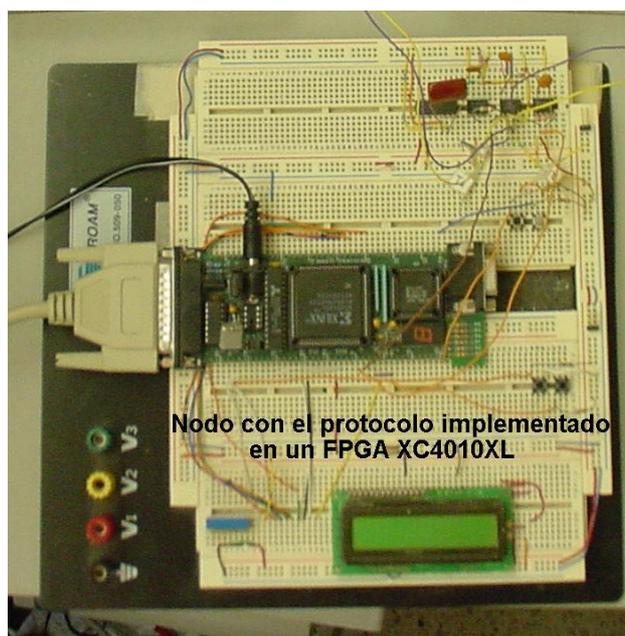


Figura 11. Nodo basado en FPGA.

### 3.7. Aplicaciones en la enseñanza

Utilizando la red de iniciación que se presenta en este artículo se pueden diseñar y desarrollar aplicaciones sencillas destinadas a la enseñanza. En dichas aplicaciones se puede utilizar la estación de monitorización para visualizar las distintas tramas CAN que circulan por el bus y analizar así su significado y el modo de operación del protocolo.

Se pueden diseñar y realizar diversas prácticas donde se establezcan controles de ciertos dispositivos situados o conectados a los nodos de la red desde elementos de control que están en nodos distintos y remotos. Por ejemplo, se puede realizar el control de la velocidad de un motor de corriente continua situado en un nodo CAN (Figura 9) utilizando un potenciómetro situado en otro nodo, o se puede visualizar el valor de tensión suministrado por un potenciómetro de un nodo en el display de 7 segmentos de otro nodo remoto. Los ejemplos anteriores de control de velocidad de un motor o visualización de un dato remoto se llevan a cabo a través del envío de una serie de tramas de petición de datos y mensajes a través de la red. Los alumnos pueden realizar dichos controles y estudiar con la estación de monitorización la secuencia de tramas enviadas por la red para realizar dichos controles, analizar la función e información de dichas tramas y su estructura. De este modo el alumno puede comprender de una forma práctica y con aplicaciones de comunicaciones reales el modo de operación del protocolo CAN, siendo un complemento importante al estudio teórico del correspondiente estándar.

## 4. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

Dada la importancia del protocolo CAN dentro del área de las comunicaciones industriales, es muy interesante que los alumnos de carreras técnicas, donde se imparten estudios sobre buses de campo, adquieran un conocimiento básico sobre este protocolo. Para ello deben realizar prácticas basadas en un entorno de comunicaciones CAN. Por este motivo, en el Departamento de Tecnología electrónica de la Universidad de Vigo se inició un proyecto para diseñar y desarrollar una red de comunicaciones industriales que pudiera ser utilizada como un entorno de enseñanza donde los alumnos pudiesen realizar una serie de prácticas y estudiar

con detalle el modo de operación del protocolo CAN. Para diseñar los nodos de esta red se han utilizado diferentes tecnologías y elementos de bajo coste, los cuales han sido comentados en el presente artículo. Estos nodos permiten realizar aplicaciones de control y monitorización con fines eminentemente didácticos.

Los desarrollos futuros con potencial en la educación universitaria incluyen el aprendizaje aplicado a la industria automovilística y otras, como son:

- Las especificaciones formales del bus CAN mediante herramientas de descripción formal SDL (Specification and Description Language) como ObjectGeode de Telelogic y Cinderella SDL de la firma Cinderella ApS. También se encuentra en desarrollo la especificación de los estándares CANopen, DeviceNet y FlexRay mediante el lenguaje unificado de modelado UML (Unified Modeling Language).
- La demanda actual de instalación de dispositivos electrónicos en la automoción para comunicación y control ha creado una tendencia hacia la utilización de mayor potencia eléctrica en los automóviles de cara a satisfacer necesidades futuras. Informes técnicos actuales prevén una transición de baterías de 12 V a baterías de 36 V para cargas con alta y baja demanda de potencia. Así, la creación de nuevas herramientas de síntesis para el diseño de nuevos circuitos integrados con señales mixtas ha supuesto un cambio importante que dará nuevas oportunidades a los investigadores en tecnologías de la información.
- La integración software de las técnicas de descripción formal (FDTs: Formal Description Techniques) [9] y nuevos paquetes que proporcionan nuevas funcionalidades de los buses de campo, como redes de acceso, es un área de gran interés para nuevos desarrollos.
- Otra línea de investigación interesante es la de tecnología de buses de campo inalámbricos (wireless), no sólo en el sector de la industria de la automoción si no también en todos los sectores de la industria.

## 5. AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en este artículo ha sido realizado gracias a tres proyectos de investigación y desarrollo financiados por las siguientes entidades: Secretaría Nacional de Investigación y Desarrollo y CICYT, Ref. DPI2000-1702 y TIC2001-3701-C02-01, Gobierno Central (Madrid, España); y Consellería de Presidencia, Ref. PGIDT01TIC30301PR, Xunta de Galicia (España).

## 6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Bosch, *CAN specification Version 2.0*, Robert Bosch GmbH, Septiembre 1991.

[2] M.A. Domínguez, *Aportación al análisis del nivel de enlace en protocolos de comunicación para buses de campo normalizados*, Tesis doctoral, Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad de Vigo, España, Septiembre 2000.

[3] K. Etschberger, *Controller Area Network: Basics, Protocols, Chips and Applications*, IXXAT Press, 2001.

[4] E. Guzmán, *Implementación del protocolo de bus de campo CAN en un dispositivo lógico programable utilizando VHDL*, Tesis de Maestría, Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional, México, Febrero 2003.

[5] V. Herrero, F. Ballester, A. Sebastián, F. Mora y J. Montesinos, "El bus CAN: descripción y funcionamiento", *Mundo Electrónico*, n° 318, pp. 44-50, Marzo 2001.

- [6] ISO 11898, *Road Vehicles – Interchange of digital information – Controller Area Network (CAN) for high-speed communication*, ISO, 1993.
- [7] ISO 11519-2, *Road Vehicles – Low-speed serial data communication – Part 2: Low-speed Controller Area Network (CAN)*, ISO, 1994.
- [8] D. Marsh, “Automotive design sets RTOS cost performance challenges”, *EDN*, pp. 32-42, Septiembre 1999.
- [9] P. Mariño, M.A. Domínguez, F. Poza, y J. Nogueira, “Field bus data link layer development by formal description languages”, *IEEE Industrial Electronics Society, Proceedings of the International Workshop on Soft Computing in Industry*, Muroran, Japón, pp. 431-436, Junio 1999.
- [10] P. Mariño, *Las Comunicaciones en la Empresa: Normas, redes y servicios*, RA-MA, 2ª edición, 2003.
- [11] P. Mariño, M.A. Domínguez, F. Poza y J. Nogueira, “Buses de Campo (I): características y aplicaciones”, *Automática e Instrumentación*, nº 314, pp. 69-79, Enero 2001.