

IEm: un Bus de Campo de Bajo Consumo

Antonio Barbancho¹, Alberto Menéndez², Mauricio Castaño³, Julio Barbancho⁴, Félix Biscarri⁵

Grupo de Investigación Instrumentación Electrónica y Aplicaciones (Grupo IEA)

Departamento de Tecnología Electrónica. Universidad de Sevilla.

Escuela Universitaria Politécnica. C/ Virgen de África, 7. 41011 Sevilla. España.

Tlf: (+34) 95 455 28 37. Fax: (+34) 95 455 28 33

¹ayboc@us.es, ²amenen@us.es, ³mauricr@dte.us.es, ⁴julenbc@terra.es, ⁵fbiscarri@us.es

Resumen

Este trabajo de investigación pretende aplicar los buses de campo en lugares hasta ahora no explorados por problemas de consumo de potencia o coste. Tras analizar algunas soluciones del mercado, se ha diseñado un bus de campo con requisitos de bajo consumo, sin renunciar a las prestaciones. Una vez terminado el diseño de la capa de nivel físico, las simulaciones muestran un consumo de 9 mA para 255 estaciones (35 μ A por estación).

1. Introducción

Este trabajo se encuadra dentro de un proyecto de I+D del Grupo IEA sobre plantas desaladoras de agua compactas con control digital integrado. Este tipo de equipos se caracteriza por disponer de una gran cantidad de sensores y actuadores en un espacio reducido, típicamente del tamaño de un frigorífico familiar [1]. El presente artículo propone el uso de buses de campo en este tipo de ámbitos, hasta ahora nula o escasamente explorados. Algo parecido se puede aplicar a redes de instrumentación autónomas, como las estaciones meteorológicas. Estos entornos han presentado tradicionalmente diversos problemas para la implantación de los buses de campo, principalmente el coste y consumo de potencia. En [2] se comenta que si bien la interconexión serie de los dispositivos puede ser relevante tanto para sistemas de medida y control a gran escala como para los más pequeños, el valor añadido de este enfoque sólo se aprecia para los grandes sistemas industriales.

Nuestro trabajo pretende demostrar que los recientes avances tecnológicos permiten contradecir la anterior afirmación, sobre todo si se tiene en cuenta la disminución de costes de programación de los equipos inteligentes, debido a la partición y encapsulamiento de las tareas [3].

El trabajo desarrollado hasta la actualidad se ha centrado en las siguientes tareas:

- Revisión de buses actuales, con objeto de determinar su adecuación al entorno de trabajo señalado, haciendo hincapié en sus características de optimización del consumo de energía. Un breve resumen de dicho trabajo se muestra en la sección 2.
- Especificación de un protocolo de nivel físico optimizado para bajo consumo de energía [4]. Dado que no se ha encontrado un protocolo actual que satisfaga los requerimientos de eficiencia

energética y que, al mismo tiempo, cumpla otros requerimientos como el número de elementos conectables al sistema, acceso determinista al bus, velocidad de transferencia, calidad de servicio, etc., se ha decidido diseñar un bus a medida bautizado con el nombre *Bus IEm*. Se han estudiado distintas técnicas encaminadas a la reducción del consumo y se han realizado medidas empíricas del consumo de diversos transceptores comerciales. También se han realizado simulaciones de distintas metodologías de acceso al medio para medir su consumo. La sección 3 trata este tema con más detalle.

- Finalmente, en la sección 4 se muestran las líneas de continuidad de este trabajo y se esbozan las técnicas para la optimización del consumo a todos los niveles del protocolo.

2. Revisión de algunos buses actuales

El punto de partida de este estudio ha sido la revisión de buses presentes en distintos sectores de la industria. Nacidos al amparo de determinados sectores industriales o de instituciones nacionales, muchos de ellos han sido estandarizados, pero sin lograr imponerse de una manera general. Algunos son estándares internacionales y otros no. Unos especifican sólo los niveles más bajos de las comunicaciones; en cambio, otros especifican hasta el más mínimo detalle del nivel de aplicación o lenguajes de programación de dispositivos. El objetivo era evaluar principalmente el consumo de potencia, la adecuación a la aplicación destino y la complejidad relativa, como medida del costo.

Así, un bus con una capacidad de transmisión de 1 Gbps está bien si las prestaciones no se dan a cambio de un coste elevado de la tecnología o un consumo de potencia desmesurado, sobre todo teniendo en cuenta el ámbito de aplicación. Un bus de altas prestaciones quizás sea muy interesante para aplicaciones multimedia en las que puede necesitarse la difusión de imágenes y sonido de alta calidad en tiempo real. Sin embargo, este no es el entorno típico de los buses de campo industriales en los que se muestran algunas decenas de sensores pocas veces por segundo.

Entre los buses serie disponibles en el mercado, destaca por su bajo consumo 1-Wire de Dallas Semiconductors [5]. Ha sido diseñado para operar sobre un cable de dos hilos que transporta las comunicaciones y la alimentación mediante un sistema denominado *parasite power*, consistente en la

alimentación de los dispositivos remotos entre cada bit transmitido. La energía se almacena localmente en pequeños condensadores para usarla durante la comunicación. No obstante, su velocidad de funcionamiento, del orden de 16 Kilobits por segundo (Kbps), la escasa disponibilidad de potencia para alimentar sensores y lógica, y su carácter de protocolo propietario, lo invalidan.

I²C (*Inter-Integrated Circuits*) fue diseñado por Philips para conectar circuitos integrados (CI) complejos dentro de una placa de circuito impreso. Sin embargo, su uso se ha extendido y diversos fabricantes soportan este estándar que ha evolucionado desde su especificación inicial de 100 Kbps. Entre sus ventajas está la reducción del patillaje de los CI, lo que, a su vez, simplifica la interconexión de los mismos (PCB más simple, fácil aislamiento de las líneas mediante optoacopladores, etc.). Sin embargo, no está preparado para conectar dispositivos separados por distancias superiores al metro.

El medio físico preferido para la interconexión de diversos dispositivos en grandes distancias es, sin duda, RS-485 [6]. Es la base de estándares muy utilizados como Profibus [7], Interbus [8], CAN [9] (y sus derivados DeviceNet [10] y P-NET [11]) y WorldFIP [12]. Permite velocidades de operación de hasta 10 Mbps y distancias de hasta 1200 metros.

Entre las ventajas de RS-485 está la capacidad de conectar hasta 32 nodos en el bus y el uso de electrónica sencilla y barata (no se necesitan tensiones elevadas como RS-232, ni técnicas de modulación). Sin embargo, buena parte del éxito de RS-485 se debe al uso de una comunicación balanceada, que le confiere una gran inmunidad al ruido y le permite transmitir más rápido y más lejos. Otros buses analizados también usan esta técnica, como USB [13] y LVDS [14]. No obstante, USB usa conexiones punto a punto y una topología arborescente basada en concentradores que implica un gran consumo de energía únicamente para retransmitir la información a todos los puntos. En cambio LVDS (*Low Voltage Differential Signalling*) pretende reducir el consumo de RS-485 a base de reducir los niveles de tensión de 5V a 400 mV. Sin embargo, es un estándar punto a punto (aunque se prepara una versión multipunto) y especialmente diseñado para cubrir distancias muy cortas (del orden de algún metro) y para transmitir a grandes velocidades (del orden del Gbps).

Finalmente, se analizaron un conjunto de buses que utilizan técnicas de modulación para incluir sobre un único par de hilos alimentación y comunicaciones: HART, IEC 1158-2 [15] (medio físico de Foundation Fieldbus y Profibus PA) y ASI [16]. HART es una evolución de la técnica de transmisión analógica mediante bucle de corriente 4-20 mA, por lo que su consumo es elevado. IEC 1158-2 tiene una velocidad de transmisión limitada (31 Kbps) y ASI fue pensado para controlar hasta 256 líneas digitales de entrada/salida, por lo que su campo de aplicación está muy limitado.

En base a los datos recopilados, se decidió basar la capa física del bus de campo en RS-485, aunque no se iba a basar

en los buses actuales, buscando una mayor eficiencia energética.

3. Reducción del consumo energético

3.1. Razones para la reducción del consumo energético

Son numerosas las razones que aconsejan la reducción del consumo energético de los equipos electrónicos. Sin ánimo de ser exhaustivos, podríamos citar:

- Simplificación de la fuente de alimentación: un sistema que consume poca energía genera menos ruido en la salida de la fuente, por lo que el diseño de la ésta se hace más simple. Al reducir la potencia disipada, se reducen las necesidades de ventilación, con lo que se puede aumentar el grado de protección IP del sistema.
- Reducción de la fuente de alimentación: por la misma razón que antes, la fuente ocupa menos espacio físico al emplear disipadores más pequeños o eliminarlos totalmente.
- Se disminuyen los problemas asociados a los transitorios y las caídas de tensión debidas a las largas distancias; así se permite la reducción de las tensiones de alimentación o el aumento de la longitud del bus.
- Mayor número de fuentes de energía: paneles solares, baterías, etc.
- Factores medioambientales: un menor consumo eléctrico implica una menor generación de energía y, por tanto, una disminución de los niveles de contaminación asociados a la generación. Si el consumo es lo suficientemente bajo, se posibilita la generación de energía barata localmente a partir de fuentes limpias y renovables.

Como puede comprobarse, la reducción del consumo energético del sistema de comunicaciones presenta ventajas incluso en las aplicaciones con grandes necesidades de energía, como el control de motores, electroválvulas o temperatura típicos de los procesos industriales.

3.2. Técnicas encaminadas a la reducción del consumo

Las técnicas encaminadas a la mejora de la eficiencia en el consumo de energía requieren la reducción de la disipación de energía en todas las partes del diseño y durante todas las etapas del proceso de diseño, siempre teniendo en cuenta los requerimientos de prestaciones del sistema y la calidad de servicio [17].

A nivel físico, la optimización del consumo de IEC se ha realizado mediante cuatro procedimientos básicos:

- Elección de *transceivers* RS-485 de bajo consumo.
- Eliminación de las resistencias de terminación del bus.
- Empleo de una señal de habilitación de comunicaciones.

- Optimización de la velocidad de transmisión.

3.2.1. Electrónica de bajo consumo

Se realizaron diversas pruebas de *transceivers* RS-485 tras una selección entre distintos fabricantes. Se pudo constatar una gran diferencia entre los distintos dispositivos [4]. Sirva de ejemplo el dato de dos de ellos: el MAX3471 de MAXIM y el SN75ALS176 de Texas Instruments, con 1,6 μ A y 30 mA de consumo en reposo, sin cargar las salidas, respectivamente.

Aspectos claves a la hora de la selección fueron dicho consumo en reposo y sin carga (*quiescent current*) y la posibilidad de entrar en un modo de bajo consumo (*sleep* o *power-down*). También decisiva es la posibilidad de reducir la tensión de alimentación. La elección final recayó en el MAX3471 [18] por diversas razones:

- Consumo imbatible de 1,6 μ A en reposo.
- Capacidad de reducción dinámica de la tensión de alimentación hasta 2'5V. A menor tensión de alimentación, menor consumo, pero también, menor margen de ruido, menor capacidad de cargar el bus y menor distancia límite para éste. En la sección 4 se discute más sobre este tema.
- Impedancia de entrada ocho veces superior al estándar, que permite, o bien cargar menos el bus para un determinado número de estaciones (menor consumo de los transmisores), o bien multiplicar por ocho el número de estaciones en él, llegando hasta 256 nodos.
- Operación a prueba de fallos (*Fail Safe*) del receptor, que garantiza un 1 lógico a su salida cuando las entradas del receptor están en corto, abiertas o simplemente en un bus en el que todos los transmisores están deshabilitados. Esto permite eliminar las resistencias de polarización del bus [19] con el consiguiente ahorro energético.
- Transmisores con *slew-rate* limitado, lo que reduce las interferencias electromagnéticas (EMI) y las reflexiones causadas por buses mal terminados o simplemente sin terminación. Nuestros experimentos muestran que en un cable de 25 metros sin resistencias de terminación y para una velocidad de transmisión de 64 Kbps, la señal recibida está libre de errores debidos a las reflexiones. Esta capacidad permite prescindir de las resistencias de terminación de bus en la mayor parte de los casos, eliminando una de las principales ineficiencias energéticas de este tipo de comunicación (del orden de 60mA de consumo estático).

3.2.2. Empleo de bus no terminado

Según la teoría de líneas de transmisión, si una señal que se propaga a lo largo de un conductor encuentra un cambio en la impedancia del medio, se genera una reflexión que recorre el camino inverso. En el caso de un cable no terminado, dicho cambio de impedancia ocurre en los extremos, entre la impedancia característica del cable (120

Ω) y un receptor (96 K Ω) o su ausencia (infinito). Dichas reflexiones pueden provocar que la señal original se degrade de forma severa (Fig. 1). DRIN es la señal a transmitir, a la entrada en el transmisor. DO+ y DO- son las salidas del transmisor, mientras que RI+ y RI- son las entradas del receptor. Finalmente RO es la señal recibida, a la salida del receptor.

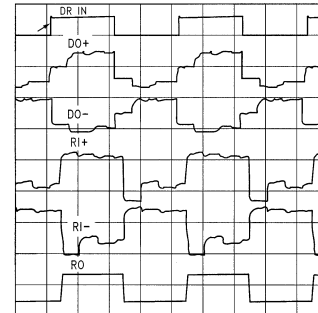


Fig.1. Reflexiones en un bus no terminado

No obstante, las consecuencias de dichas reflexiones a velocidades bajas (por debajo de los 100 KHz) y para buses cortos son prácticamente insignificantes de tal forma que el receptor es capaz de regenerar la señal antes de que ésta sea muestreada. Dependiendo del entorno de aplicación del bus y de la eficiencia de los protocolos empleados, el uso de velocidades bajas puede no ser una gran restricción. En concreto, para el caso de la planta desaladora, la distancia máxima estimada para el bus es de 25 metros.

3.2.3. Señal de habilitación de direcciones

En [4] puede encontrarse una amplia discusión de distintas topologías de bus encaminadas a la disminución del consumo de energía manteniendo los receptores apagados el mayor tiempo posible. Los resultados empíricos muestran que la mejor topología emplea una línea adicional al bus bidireccional de comunicaciones para indicar a los posibles receptores que empieza una transmisión. De esta forma es posible mantener la circuitería de recepción (*transceivers* RS485, UART, etc.) apagados cuando no hay transmisión (Fig 2.)

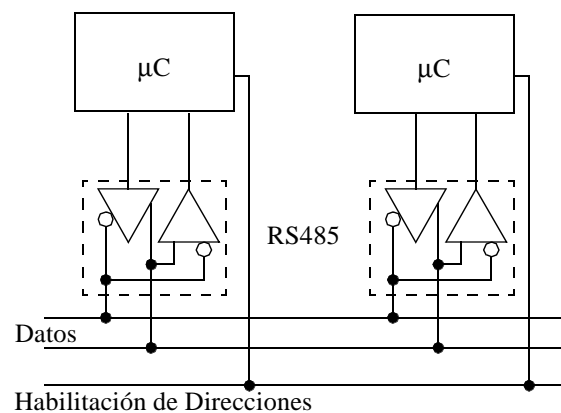


Fig. 2. Sistema de selección por habilitación de direcciones

3.2.4. Optimización de la velocidad de transmisión

Para los distintos *transceivers* seleccionados se midieron experimentalmente los datos de consumo en distintas situaciones de comunicación NRZ (*Not Return to Zero*). Se realizaron medidas para la transmisión continuada de los valores AA₁₆, FF₁₆ y 00₁₆ mediante un mecanismo tipo UART, que inserta un bit de inicio a cero, y un bit final a uno. El primero de ellos representa el peor caso, mientras que los otros dos son el mejor caso.

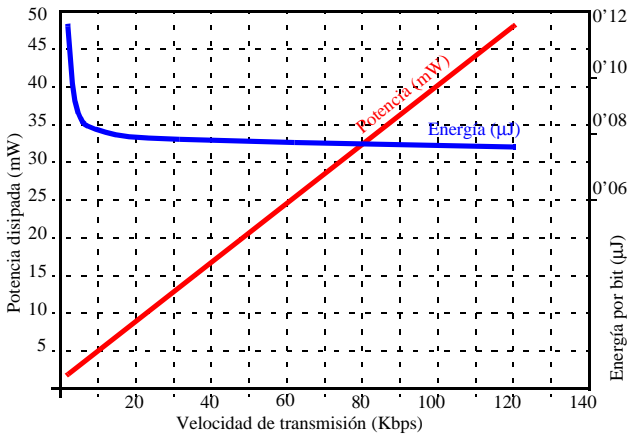


Fig. 3. Consumo potencia-energía por velocidad de transmisión

La fig. 3 muestra los resultados de consumo de potencia y energía por bit transmitido. Como puede observarse, existe una relación lineal entre la potencia disipada y la velocidad de transmisión. Sin embargo, la energía por bit desciende abruptamente hasta los 10 Kbps, para descender de forma continuada, pero más suave con la velocidad de transmisión. Por tanto, se puede deducir que las velocidades mayores implican una mayor eficiencia energética por bit transmitido, pero también suponen una mayor potencia instantánea y posibles problemas de reflexiones. Nuestros cálculos concluyen que un equilibrio razonable se alcanza a 64 Kbps, siempre que la aplicación lo permita.

4. Líneas de continuación

Simplemente explorando el nivel físico, los resultados obtenidos son esperanzadores y nos animan a continuar la labor desarrollada. Las simulaciones del sistema diseñado presentan unas cifras de consumo sorprendentes: una red con 255 nodos conectados al bus consume del orden 9 mA realizando lecturas continuamente de diez *bytes* de media a una tasa de 64 Kbps, lo que implica un consumo por elemento de unos 35 μA.

Entre las labores que se están desarrollando en la actualidad o que se desean desarrollar en un futuro próximo podemos destacar:

- Aplicación de las técnicas *Dynamic Voltage Scaling* (escalado dinámico de tensiones) al diseño del protocolo, tanto en el entorno de los niveles *software* del protocolo [20], como a nivel de los propios *transceivers*. Se trata de estudiar y establecer mecanismos de escalado de tensión de

alimentación de los *transceivers* en función de la carga y longitud del bus y la tasa de errores actual.

- Evaluación y especificación de técnicas óptimas de control de acceso al medio que minimicen el tiempo de acceso de los distintos nodos, así como el tiempo de arbitración.
- Elaboración de protocolos de nivel de enlace de datos y aplicación con la menor sobrecarga posible sobre las tramas de nivel físico.

5. Conclusiones

Los avances en el control distribuido y la instrumentación inteligente se han mantenido lejos de los sistemas de bajo coste y bajo consumo. Sin embargo, en los últimos años se ha producido una revolución que ha llevado a que los dispositivos electrónicos sean cada vez más capaces, consuman menos energía y sean más baratos. El trabajo desarrollado demuestra que es posible aplicar la tecnología de los buses de campo a nuevos escenarios en los que el bajo consumo es un requisito irrenunciable.

Como consecuencia del estudio, se ha comprobado que no existe un sistema que satisfaga simultáneamente los requisitos de consumo y prestaciones establecidos para la aplicación. Esto nos ha hecho decidimos por diseñar un bus de comunicaciones a medida con dos objetivos en mente: no renunciar a las prestaciones y batir la cifras de consumo. Las ventajas de un consumo mínimo son evidentes: permite el uso de fuentes de alimentación más variadas, como baterías o paneles solares; simplifican el diseño y dimensionamiento de la propia fuente de alimentación; reduce la emisión de EMI; se reducen los problemas asociados a los transitorios y caídas de tensión debidas a largas distancias; etc.

Los primeros resultados obtenidos son realmente alentadores y aconsejan la continuación de esta línea de investigación.

6. Referencias

- [1] A. Menéndez, E. Yaglián, F. Domínguez-Adame, M.A. Leal, M. Castaño, G. Domínguez-Adame, L. Velasco. "Desaladora de Agua por Ósmosis Inversa con Control Digital Integrado". V Simposio sobre El Agua en Andalucía. Almería, septiembre 2001.
- [2] J.R. Jordan, "Serial Networked Field Instrumentation". 1995, John Wiley & Sons.
- [3] Jack Ganssle, "The Art of Designing Embedded Systems". 2000, Newnes. ISBN 0-7506-9869-1.
- [4] A. Barbancho, M. Castaño, A. Menéndez, y F. Simón. "Cuando el menor consumo es una condición básica". Automática e Instrumentación nº 322. Octubre 2001.
- [5] Dallas Semiconductors. "1-Wire Net Design Guide". Tech Brief1.

- [6] EIA Standard EIA RS-485, "Standard for Electrical Characteristics of Generators and Receivers, for use in Balanced Digital Multipoint Systems", 1983.
- [7] PROFIBUS Nutzerorganisation e.V. Wesseling Germany, "PROFIBUS Standard", Translation of the German Standards DIN 19245 (Part1 and Part2), 1991.
- [8] Phoenix Contact, "Interbus - Diagnostic Advantages of an Intelligent Ring System". Technical Report, rev B, Marzo 1997.
- [9] ISO DIS 118998, "Road Vehicles - Interchange of Digital Information, Controller Area Network (CAN) for High Speed Communication", 1992.
- [10] Open DeviceNet Vendor Association, Inc. "Connected with DeviceNet", mayo 1997.
- [11] International P-NET User Organization, "The P-NET Fieldbus for Process Automation".
- [12] The WorldFIP Organisation, "The WorldFIP Protocol", noviembre 1996.
- [13] USB Implementers Forum, "USB 2.0 specification".
- [14] TIA/EIA-644 Standard.
- [15] IEC, "IEC 1158-2: Fieldbus Standard for Use in Industrial Control Systems, Part 2", 1993
- [16] AS-International Association, "The AS-Interface", junio 1997.
- [17] Massoud Pedram, "Power Optimization and Management in Embedded Systems", University of Southern California.
- [18] MAXIM. MAX3471 Datasheet. "1.6uA, RS485/RS422, Half Duplex, Differential Transceiver for Battery-Powered Systems". Febrero de 1998.
- [19] John Goldie, "FAILSAFE Biasing of Differential Buses", National Semiconductor Application note 847. Julio 1992.
- [20] T. Pering, T. Burd and R. Brodersen, "The simulation and evaluation of dynamic voltage scaling algorithms". Proc. Int. Symp. Low Power Electronics and Design, agosto 1998.