

Diseño de un Bus de Campo con Requerimientos de Mínimo Consumo

Antonio Barbancho, Mauricio Castaño, Alberto Menéndez, Francisco Simón
Grupo de Investigación Instrumentación en Electrónica y Aplicaciones (Grupo IEA)
Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad de Sevilla.
Escuela Universitaria Politécnica
C/ Virgen de África, 7. 41011 Sevilla. España
Email: ayboc@cica.es

1. INTRODUCCIÓN

El presente artículo recoge una serie de trabajos de investigación realizados en la Escuela Universitaria Politécnica de la Universidad de Sevilla por el grupo IEA.

El objetivo de estos trabajos es diseñar un bus de campo con requerimientos de mínimo consumo. El bus se pretende aplicar en un entorno acotado dentro de un determinado equipo industrial. En concreto, se trabaja en el diseño de una planta desaladora de agua integrada y portátil. En el interior de un armario de unos dos metros de alto, y setenta centímetros de ancho y profundidad se alberga una gran cantidad de sensores y actuadores (elementos de campo) que deben controlarse con un PLC. Tradicionalmente la conexión de los elementos de campo y el PLC se venía haciendo en forma de estrella: cada elemento se conecta al PLC mediante su propio cable. Si bien un equipo de estas características, en el que hay multitud de electroválvulas y bombas, no tiene estricta necesidad de un bus de bajo consumo, servirá como escenario idóneo para comparar esta solución con otras estandarizadas como el bus ASI, ... etc.

En otros entornos con necesidades parecidas, como en la industria de procesos continuos (químicas, petroleras o farmacéuticas), se han venido implantando con éxito una serie de buses de campo con importantes logros: reducción de costes de cableado (instalación y mantenimiento), mayor fiabilidad y precisión de las medidas, diagnósticos, configuración y calibración remotos, etc.

La principal diferencia de los equipos industriales objeto de este estudio con las grandes plantas de proceso es el tamaño. No obstante, han aparecido distintas soluciones estandarizadas que son especialmente adaptadas a este entorno, como el bus ASI o Interbus. En línea con estos buses de campo más pequeños, nuestros trabajos permiten afirmar que se mantiene una reducción de los costes de cableado que justifica, junto con otras razones, el nuevo sistema.

Sin embargo, para determinadas aplicaciones pueden presentarse serios inconvenientes, entre los que destaca el consumo del propio sistema de comunicaciones. En equipos con alimentación por baterías o por paneles solares, el consumo total del sistema, incluyendo las comunicaciones, debe reducirse al máximo. En el caso de equipos industriales, aunque posiblemente tengan algunos elementos con grandes demandas de potencia (bombas, electroválvulas, calentadores, ... etc), la reducción del consumo del bus de campo conlleva toda una serie de ventajas que son analizadas en el epígrafe 2.6.

Los sistemas tradicionales de transmisión analógica se pueden dividir en dos grandes grupos: los que transmiten la señal mediante una tensión, y los que lo hacen mediante una intensidad. Los primeros tienen la ventaja de presentar un consumo muy bajo inherente a la propia transmisión de la información, pero adolece de un grave problema: la señal se degrada debido a la impedancia del cable y es muy sensible a las posibles interferencias, por lo que para grandes distancias puede ser inservible. En cambio, los sistemas de transmisión por intensidad no presentan este inconveniente a costa de suponer un

consumo de 12 mA de media por señal¹. Así, tradicionalmente se han usado estos últimos en las grandes plantas de procesos, mientras que los sistemas de transmisión por tensión se han usado en los pequeños equipos industriales.

Los sistemas basados en bus no sufren la degradación de la información debido a las distancias, puesto que las señales están codificadas digitalmente. Sin embargo, los protocolos empleados pueden llegar a suponer consumos parecidos a los de una transmisión por intensidad. Por ello, nuestros esfuerzos están dirigidos a minimizar el consumo del sistema de comunicaciones. Las ventajas de esta estrategia son indudables: se puede reducir el tamaño de la fuente de alimentación (intensidad máxima de salida, ventilación, nivel de ruido en la salida); se disminuyen los problemas asociados a los transitorios y las caídas de tensión debidas a las largas distancias; se simplifica el diseño de los desacoplos; se abren nuevas vías alternativas de alimentación como paneles solares, baterías, etc.

El resto del artículo se estructura como sigue: en el epígrafe 2 se detallan los criterios de diseño considerados a la hora de especificar un bus idóneo para el entorno descrito. El estudio se basa en los protocolos de nivel físico únicamente. El epígrafe tercero se centra en la implementación del medio físico: se comparan dos alternativas de dispositivos electrónicos del mercado en distintas configuraciones y se evalúan las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas. El direccionamiento de los elementos del bus es el tema del epígrafe cuarto. Se estudian tres posibilidades dentro del modelo maestro-esclavo. Finalmente, el epígrafe 5 se dedica a las conclusiones.

2. CRITERIOS DE DISEÑO

2.1. DIMENSIONAMIENTO

En función a las necesidades del sistema a soportar, se detallan a continuación las necesidades mínimas de comunicación:

- 32 elementos en el bus.
- Un acceso por segundo por elemento para una media de 10 *bytes* por acceso.
- Longitud máxima: 20 metros

2.2. SIMPLICIDAD, FIABILIDAD Y TOLERANCIA A FALLOS

Aparte de los criterios fundamentales ya enunciados en el epígrafe anterior, el diseño debe ser simple sin renunciar a la versatilidad ni a las prestaciones. Un diseño simple es más barato y más fiable. También es más fácil de mantener y posiblemente de actualizar. Además, un diseño de bajo consumo contribuye a simplificar los circuitos de alimentación y abre puertas en cuanto a las fuentes.

La fiabilidad en la transmisión debe garantizarse con una buena inmunidad al ruido y protocolos adecuados de recuperación en caso de errores. El sistema debe ser determinista de forma que se garantice un tiempo máximo de espera en los accesos a cualquier elemento de la red. Relacionado con esto último, el diseño se realizará de forma que el sistema sea inmune a los fallos cualquiera que sea su clase: errores transitorios o permanentes en las transmisiones. En este sentido se estudiará la viabilidad de proteger el sistema contra los fallos de los transeptores de comunicaciones.

1. Para un sistema de señalización estandarizado de 4 a 20 mA.

2.3. COMUNICACIÓN BALANCEADA VERSUS NO BALANCEADA

La primera decisión a tomar a la hora de especificar un bus serie es el tipo de señalización: balanceada o no. La transmisión no balanceada presenta como ventajas un coste mínimo, ya que las señales necesitan un único conductor, aparte del común. Sin embargo, emiten y son muy susceptibles a las radiaciones electromagnéticas, lo que limita en la mayor parte de los casos las distancias y velocidades máximas. En la transmisión de datos balanceada se transmite la información usando la diferencia de tensión existente entre dos hilos, sin importar la tensión que presente ninguno de ellos respecto a tierra. Esto supone una baja sensibilidad frente a interferencias, reducción de las emisiones de radiación, buen rechazo al ruido en modo común, altas tasas de transmisión (>10 Mbps) y longitudes de línea que pueden llegar a 1.000 m. Como contrapartida, el número de conductores se duplica y se hacen más complejos los circuitos emisores/receptores².

En base a estas consideraciones, y dadas las necesidades del sistema, se elige una comunicación balanceada.

2.4. RS-422, RS-485, LVDS, SCSI Y USB

En la actualidad existen diversos estándares de comunicaciones balanceadas. Las normas RS-422 y RS-485 son similares y en ciertos aspectos compatibles. El primero especifica un bus de 1 emisor y hasta 10 receptores, por lo que no es válido para nuestro caso. En cambio, RS-485 es un bus *half-duplex* de hasta 32 emisores-receptores (*transceivers*). La velocidad máxima es de 10Mbps y la distancia puede llegar hasta 1200 metros. El principal inconveniente que presenta este bus (al igual que todos los que usan comunicación balanceada a grandes velocidades) es el empleo de resistencias de terminación del bus de 120Ω en los extremos, que supone un consumo de unos 80 mA independientemente de la actividad en el bus.

Para solucionar estos problemas y mejorar aún más en el apartado de la velocidad se propuso el estándar LVDS (*Low Voltage Differential Signalling*, norma EIA/TIA 644) que permite hasta 600 Mbps a costa de reducir la distancia máxima a unas decenas de metros. El consumo provocado por las resistencias de terminación se minimizan gracias a reducir las tensiones de trabajo a 400 mV (frente a los 5 voltios de RS-485). El principal problema de este estándar es que especifica conexiones punto a punto, lo que descarta una implementación tipo bus. No obstante, Texas Instruments fabrica *transceivers* LDVS con capacidad multipunto y que están en fase de estandarización.

Los estándares SCSI (*Small Computer Systems Interface*), de amplia implantación en buses de propósito general en el interior de ordenadores personales y estaciones de trabajo, han sido desarrollados para trabajar sólo a muy altas velocidades (en torno a 100Mbps) y para distancias de hasta 10 metros.

Finalmente, el último bus en llegar es USB (*Universal Serial Bus*) que pretende ser la solución universal para las comunicaciones de baja y media velocidad en el entorno de los ordenadores personales. Entre las ventajas de este estándar está su bajo precio, el tratarse de una solución completa³ y que distribuye alimentación a través del propio bus. El principal inconveniente se basa en su estructura que es arborescente basada en el uso de repetidores multipuerta, llamados concentradores. El empleo de estos repetidores multiplica la potencia disipada por las comunicaciones.

2. Esta desventaja es muy relativa, ya que con las modernas técnicas de integración la diferencia en precio puede llegar a desaparecer. Adicionalmente, los sistemas no balanceados suelen usar dos fuentes de alimentación, una positiva y otra negativa, lo que puede compensar la complejidad.

En base a lo expuesto y teniendo en cuenta las mejoras realizadas por los fabricantes respecto del estándar, se ha elegido RS-485 como base del bus. Entre las mejoras que se han ido introduciendo y que se pueden encontrar en los *transceivers* comerciales podemos destacar:

- Mayor impedancia de entrada de los receptores que permite hasta 256 elementos en el bus (frente a los 32 originales).
- Dispositivos optimizados para distintas velocidades (controlando el *slew-rate*) que permite descuidar el diseño de los terminadores y, en algún caso, eliminarlos totalmente para distancias de algunas decenas de metros, con la consiguiente reducción del consumo.
- Dispositivos de ultra bajo consumo, que baten las cifras de LVDS.
- Dispositivos protegidos contra descargas, sobretensiones, sobreintensidades, cortocircuitos, etc.
- Dispositivos a pruebas de fallos, que garantizan un nivel válido en el bus ante diversos errores: bus no terminado, en corto o en abierto.

2.5. CONTROL DE ACCESO AL BUS

En un medio compartido como un bus debe existir alguna forma de garantizar que sólo uno de los nodos conectados a él accede al mismo tiempo, o al menos, en caso de que varios lo hagan simultáneamente, proporcionar los medios para resolver el conflicto (denominado colisión) y resolverlo a favor de alguna de las estaciones.

El modelo más simple es el maestro-esclavo. Uno de los dispositivos tiene el papel de maestro y es el único que tiene capacidad para iniciar las comunicaciones. El resto de los nodos son esclavos. Todas las transacciones son escrituras o lecturas del maestro a uno o varios esclavos. Esta es la forma más extendida en redes de ámbito industrial, utilizado desde hace tiempo y que goza de gran simplicidad y robustez. Su principal inconveniente es que la respuesta ante eventos aperiódicos de los esclavos no es ágil, ya que no se realiza hasta el siguiente acceso del maestro al esclavo en cuestión. Además, el fallo del maestro provoca que caiga todo el sistema.

Otros sistemas hacen que todos los dispositivos sean iguales, como el CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection*) usado en redes tan populares como Ethernet. Cuando uno de los nodos quiere transmitir, primero comprueba que la línea esté libre. Si es el caso, comienza a transmitir, pero sigue comprobando la línea durante un tiempo para asegurarse de que lo que recibe coincide con lo que transmite. De esta forma se pueden detectar colisiones provocadas por estaciones que empiezan a transmitir simultáneamente. En caso de colisión, se aborta la transmisión y se espera un tiempo aleatorio para volver a intentarlo. Otros sistemas, como el bus CAN (*Controller Area Network*) se basan en evitar las colisiones en lugar de detectarlas. Son los sistemas CSMA/CA (*CSMA/Collision Avoidance*).

Dada la complejidad de estos sistemas y la necesidad de que todos estén atentos al bus en todo momento, implica, a priori, un consumo eléctrico superior al modelo maestro-esclavo. Esto nos hace elegir el modelo maestro-esclavo para nuestro sistema. Además, se ha previsto que la configuración física del bus permita implementar un modelo de

-
3. USB especifica todas las capas de comunicaciones, desde los conectores y niveles de tensión, hasta los mensajes que se pueden intercambiar, a diferencia de los otros estándares que sólo tratan el nivel físico. También se pueden encontrar estándares completos que usan como nivel físico algunos de los mencionados. Por ejemplo Interbus o Profibus usan como base el estándar RS-485. En cualquier caso, en este trabajo sólo se evalúan la primera capa de la pila de protocolos.

interrupción, de forma que un esclavo pueda provocar una llamada al maestro. Esto pretende eliminar uno de los principales defectos del modelo maestro-esclavo, el cual requiere mantener una frecuencia de muestreo elevada como única forma de minimizar el tiempo de respuesta a eventos aperiódicos.

2.6. REDUCCIÓN DEL CONSUMO

Ya se comentó en la introducción los beneficios de la reducción del consumo. Al igual que la simplicidad, este requisito condiciona cada faceta del nuevo desarrollo, ya que será necesario un cuidadoso diseño en todos los niveles para lograr minimizar el consumo del sistema. Para conseguir este requisito se han empleado los siguientes recursos:

- Empleo de electrónica de ultra bajo consumo: las diferencias entre los consumos de distintos dispositivos comerciales puede ser tan grande como los 1,6 μ A del MAX3471 a los 30 mA del SN75ALS176.
- Procesos de selección del esclavo, que permita desconectar los que no vayan a ser accedidos, permaneciendo en modo de bajo consumo.
- Protocolos que optimicen el consumo. Por ejemplo, el uso de una electrónica tipo UART para la serialización de la información introduce una ineficiencia de un 20% en la transmisión debido a la inserción de *bits* de inicio y fin en cada *byte* a transmitir.

3. MEDIO FÍSICO

A partir de los criterios de diseño expuestos arriba, se evaluaron los dispositivos comerciales de distintas marcas de fabricantes de circuitos integrados, como Texas Instruments, Maxim, National Semiconductor o Linear Technology y se seleccionaron dos *transceivers* RS-485 que se ajustan muy bien a estos requerimientos: el MAX1483 y el MAX3471. Los integrados están fabricados por la casa Maxim, empresa que cuida mucho el consumo y con amplia experiencia en *transceivers* de todo tipo. Para poder evaluar sus características se sometieron ambos integrados a distintas pruebas.

3.1. COMPARACIÓN ENTRE MAX3471 Y MAX1483

Estas pruebas estaban enfocadas a medir el consumo de distintas configuraciones de un emisor con un receptor, ambos alimentados con 5V, unidos por 25 metros de par trenzado tipo 24 AWG. En las pruebas no se usaron resistencias de terminación ya que no se necesitan ni grandes distancias ni elevadas velocidades de transmisión. No obstante se estudiaron las formas de onda en el receptor para comprobar que la degradación producida⁴ no era significativa. Estas medidas servirán como base para decidir la velocidad óptima de transmisión.

Las pruebas consistían en la transmisión a través de la línea de comunicaciones una señal periódica que simulara la transmisión reiterada de datos por una UART configurada con 8 *bits* de datos, 1 bit de parada y sin paridad. Se hicieron mediciones para el mejor caso (transmisión reiterada del carácter 00₁₆ o del FF₁₆) y el peor caso (transmisión del carácter AA₁₆). En el primer caso la onda resultante después de añadir un bit de inicio a 0 y un bit de parada a 1 es de frecuencia diez veces inferior a la tasa de transferencia en *bits* por segundo con un *duty-cycle* del 10%. En el segundo, la onda resultante es de frecuencia mitad y un *duty-cycle* del 50%. Así, si se transmite a 64 Kbps, la onda resultante para el

4. El fabricante indica en sus hojas de datos que sus dispositivos típicamente cumplen la norma en ausencia de las resistencias de terminación gracias a determinadas técnicas como reducción del *slew-rate*.

peor caso es cuadrada y de 32 KHz, mientras que para el mejor caso es rectangular de 6400 bps.

3.1.1. Prueba n° 1

La prueba de la figura 1 es la conexión básica RS-485 sin resistencias de terminación. Como se esperaba, el consumo

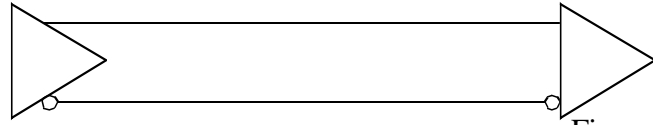


Figura 1

de intensidad tanto en el receptor como en el emisor, en ambos integrados, aumenta con la frecuencia. Sin embargo, es más interesante observar que la energía necesaria para transmitir 1 *bit* disminuye conforme aumentamos la velocidad de transmisión ya que, si bien el consumo de potencia es mayor, se hace durante menos tiempo. En la figura 2 se puede ver que la curva de energía tiene un punto de inflexión en 40Kbps a partir del cual, el descenso es mucho menor. Así, aunque la energía por *bit* disminuye, el consumo eléctrico instantáneo del sistema aumenta. Por tanto, y en aras de la reducción del consumo medio y el instantáneo, es necesario encontrar una velocidad de transmisión que optimice ambas figuras. Teniendo en cuenta las necesidades de comunicación de un sistema como el estudiado, dicha velocidad podría ser de 64 Kbps.

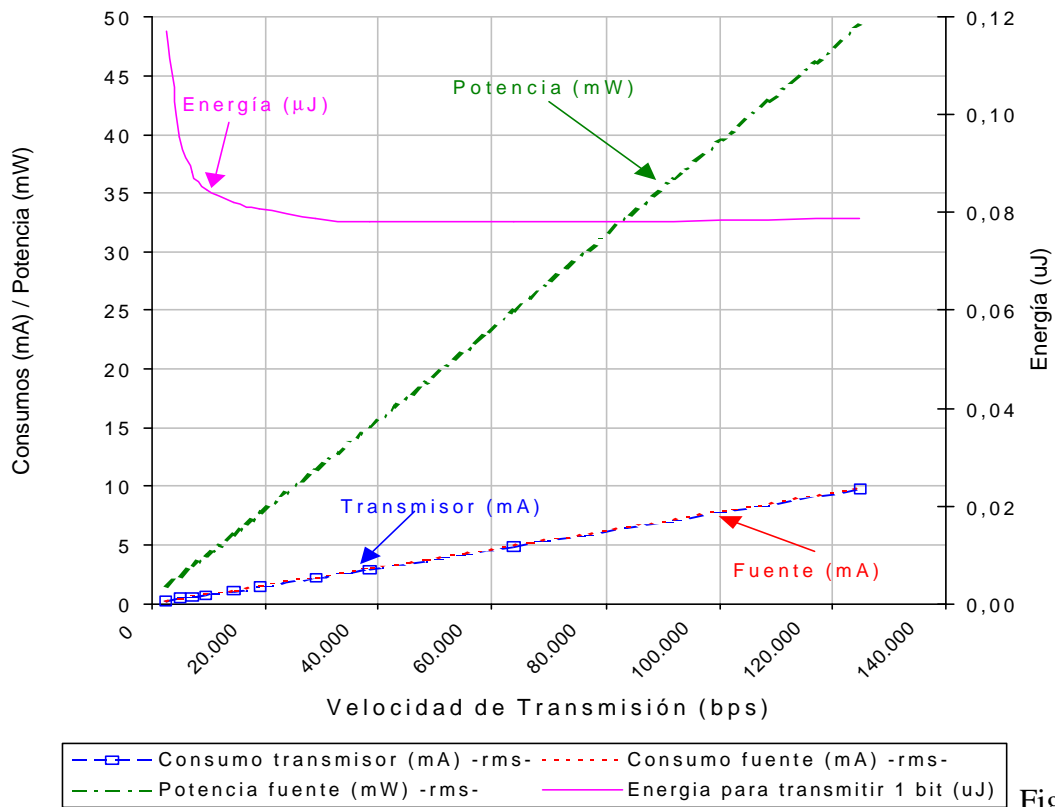


Figura 2

Volviendo a la gráfica, para el peor caso y para 64 Kbps (simulado con una señal cuadrada de 32 KHz), el MAX1483 presenta un consumo de 4,94 mA en transmisión y de 52,3 μ A en recepción, mientras que el MAX3471 consume 2,271 mA en transmisión y 13,4 μ A en recepción. Si disminuimos la tensión de alimentación en el MAX3471 a 3V obtenemos 0,696 mA en transmisión y solo 5,9 μ A en recepción.

También para 64 Kbps, pero para el mejor caso (simulado con una señal rectangular de 6400 Hz y con *duty-cycle* del 10%) los datos son: 0,98 mA en transmisión y 24,7 μ A en

recepción para el MAX1483; y 0,552 mA y 4,9 μ A respectivamente para el MAX3471 (0,258 mA y 2,9 μ A a 3V).

Esta prueba indica que el *transceiver* más indicado es el MAX3471, aunque en espera de los resultados de las otras pruebas.

3.1.2. Prueba n°2

En la figura 3 se muestra el circuito correspondiente a la prueba n° 2. Se trataba de estudiar el efecto de incluir un transformador de impulsos en el receptor para aislar galvánicamente el bus (véase el epígrafe 3.3). Puesto que no se usan resistencias de terminación, se pueden producir picos de elevada tensión en el bus. Para reducirlos se montaron diodos *zener* de 5,1 V. La posibilidad de aislar el receptor galvánicamente es muy deseable, ya que protege el bus frente a fallos en los *transceivers*. Después de realizar estas pruebas observamos que el consumo a 64 Kbps aumenta considerablemente; en el MAX1483 en transmisión, pasa de 4,94 mA a 7,37 mA cuando transmitimos AA₁₆ y empiezan a aparecer problemas de saturación en el transformador de impulsos y picos de tensión que son recortados por los diodos Zener. Estos problemas se agravan al transmitir 00₁₆ o FF₁₆, debido, en parte, a la saturación del transformador de impulsos.

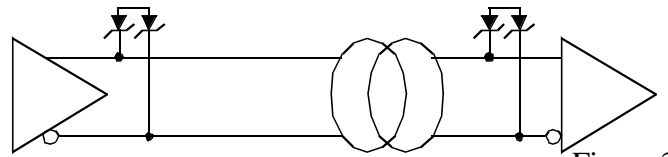


Figura 3

3.1.3. Prueba n°3

En esta prueba (figura 4) se intentó aislar completamente el bus con el uso de dos transformadores de impulsos y diodos Zener de 5,1 V para suprimir picos de tensión. Por supuesto, los problemas anteriormente descritos se agravan: los consumos a la misma velocidad y para la transmisión de AA₁₆ pasan a ser 9,8 mA y 73,4 mA para la transmisión de 00₁₆ o FF₁₆, por efecto de saturación de los transformadores. Como puede comprobarse, aquí el mejor y peor caso cambian sus papeles.

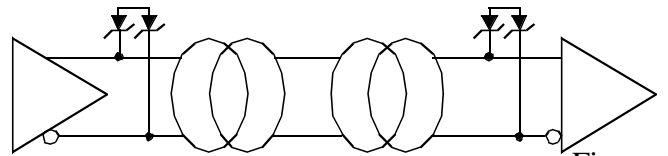


Figura 4

3.2. RESISTENCIAS DE TERMINACIÓN

El cumplimiento estricto de la norma RS-485 implica el uso de resistencias de terminación de 120 Ω en cada extremo del bus, por lo que, si el transmisor ataca el bus con una diferencia de tensión de 5 V, supone un consumo intrínseco de 83 mA, sin contar con la impedancia que presentan los receptores de los demás *transceivers* conectados al bus. Esto supone un inconveniente desde el punto de vista del bajo consumo y muchas empresas, entre ellas MAXIM, aseguran, típicamente, una correcta transmisión sin resistencias de terminación, limitando la velocidad de transmisión por debajo de la máxima que define la norma y limitando el *slew-rate* entre otras mejoras. Estos fabricantes, además, para permitir un mayor número de elementos en el bus, y de paso minimizar el consumo, aumentan la impedancia que presenta el *transceiver* hasta 8 veces, 1/8 *unit load*, lo que permite hasta 256 dispositivos, de estas características, en el bus.

3.3. TRANSFORMADORES DE AISLAMIENTO

El aislamiento del bus implica grandes ventajas, desde el punto de vista de la seguridad en entornos industriales. De hecho es común aislar el bus, bien mediante transformadores de impulsos o mediante opto-acopladores. La elección de transformadores de aislamiento se debió a que se esperaba un menor consumo que un opto-acoplador bidireccional por cada línea. Después de las pruebas realizadas se observa claramente que, si se quiere minimizar el consumo, se tiene que renunciar al uso de aislamiento en el bus.

En algunas aplicaciones no se podrá o no será recomendable prescindir del aislamiento, como en el caso de medidas de puentes. En estos casos será necesario aislar el esclavo en algún punto entre el microcontrolador y el sensor, posiblemente entre el micro y el convertidor analógico-digital.

4. DIRECCIONAMIENTO DE ESCLAVOS

Ya se ha comentado que para reducir el consumo es necesario actuar en todos los niveles. La selección de los *transceivers* citados para realizar las pruebas se debe a que, si bien el consumo del MAX3471 es menor que el del MAX1483, este último se puede apagar totalmente, reduciendo su consumo a niveles de 0'1 μ A. Esta característica se puede utilizar para reducir el consumo medio del sistema: se trata de apagar el sistema de comunicaciones todo el tiempo que sea posible. En este epígrafe se trata el problema de la selección del esclavo. El objetivo es conseguir un mecanismo que permita encender sólo el esclavo al cual se va a acceder. De esta forma, sólo se enciende un esclavo mientras los demás quedan "dormidos".

Se realizaron simulaciones para calcular los consumos esperados de distintas configuraciones de selección, tomando como base los datos de consumo a 64 Kbps medidos en el epígrafe 3.1.1 y datos típicos de microcontroladores. Se supone que disponemos de un bus RS-485 con un maestro y 255 esclavos, y que se está usando la configuración del caso 3.1.1. Los esclavos se han simulado mediante su impedancia de entrada nominal (96K Ω).

La simulación consistirá en accesos del maestro a uno de los esclavos. Los accesos serán de escritura (el maestro escribe en el esclavo) y lectura (es el esclavo el que escribe), con una longitud de 10 *bytes*, siendo el primero la dirección del esclavo seleccionado (por tanto, el primer *byte* siempre lo escribe el maestro). Se supone que la serialización es tipo UART, con 8 *bits* de datos, 1 *bit* de inicio y otro de parada y sin paridad. Los accesos se realizan uno detrás de otro sin espera entre ellos.

A continuación se recogen las distintas configuraciones que se han simulado. En ellas se detallan por separado los consumos para el esclavo que está siendo direccionado y el de aquél no direccionado. Finalmente se da el consumo para todos los esclavos, es decir, el equivalente a uno direccionado y 254 no direccionados.

4.1. SELECCIÓN CON ESPERA ACTIVA

En una primera aproximación, se realiza un montaje atendiendo a la simplicidad de elementos, sin prestar atención al consumo de cada uno de ellos. Cada esclavo, consta de un microcontrolador y un *transceiver* RS-485 (MAX3471 o MAX1483) ambos siempre activos a los que se accede de forma cíclica. El montaje básico puede apreciarse en la

figura 5. El consumo total se ha calculado como sigue: el 10% del tiempo se emplea en el

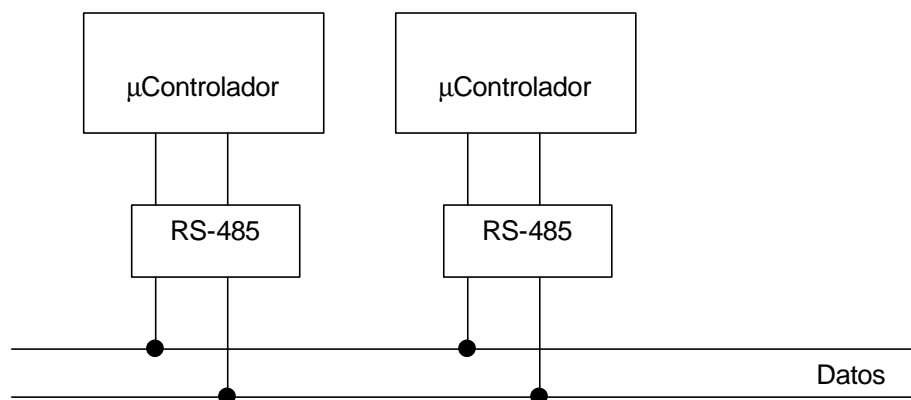


Figura 5

envío de la dirección y el 90% en la transmisión de datos. Se adjuntan los consumos calculados para el esclavo direccionado, para el no direccionado y para todos los esclavos juntos, tanto en caso de lectura como de escritura por parte del maestro.

Esclavo	Lectura		Escritura	
	MAX3471	MAX1483	MAX3471	MAX1483
Direccionado	5.254,59	11.946,23	345,90	392,30
No direccionado	345,90	392,30	345,90	392,30
Todos	93.459,09	111.982,73	88.550,40	100.428,80

Tabla 1: Selección con espera activa (Todos los datos en microamperios)

4.2. SELECCIÓN POR HABILITACIÓN DE DIRECCIÓN

El principal problema del caso anterior es la energía desperdiciada por los esclavos no direccionados que, si bien es pequeña, al ser un gran número, supone una cifra importante. La estrategia adecuada consiste en proveer de un mecanismo que permita discriminar un byte de direcciones de los de datos. Los esclavos no direccionados podrían entrar en bajo consumo tras comprobar que la transacción no les afecta. Dicho mecanismo será una línea adicional de habilitación de direcciones, que se activará justo antes de la dirección y se desactivará después del último byte de datos. La activación de esta línea se utilizará para activar los *transceivers* y la UART de los esclavos. Cuando se termina de transmitir la dirección, se despierta el microcontrolador de cada esclavo, pasando a modo activo para comprobar si la dirección recibida coincide con la que tiene asignada; en caso contrario pasa a modo de ultra bajo consumo hasta que la línea de habilitación de direcciones vuelve a situarlo en LPM3. Esto ocurre en un lapso de tiempo muy corto (<1%). El esclavo

direccionado queda en modo activo y se encarga de realizar la transmisión. El montaje básico puede apreciarse en la figura 6.

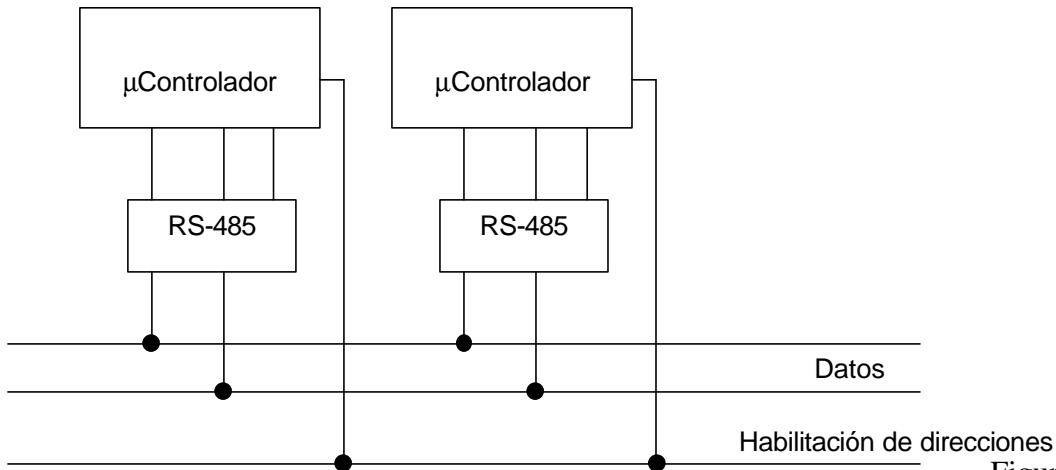


Figura 6

El cálculo de este consumo viene definido por los siguientes porcentajes de tiempo: 1% habilitación de *transceivers*, 9% envío de direcciones, 10%; comprobación de direcciones, 1%; y transmisión de datos, 89%.

Esclavo	Lectura		Escritura	
	MAX3471	MAX1483	MAX3471	MAX1483
Direccionado	5.171,85	11.789,65	320,52	366,92
No direccionado	14,80	19,95	14,80	17,95
Todos	8.948,48	16.369,52	4.095,33	4.943,96

Tabla 2: Selección por habilitación de dirección (Todas los datos en microamperios)

En este caso los consumos totales del bus disminuyen notablemente respecto al caso anterior. Además, este esquema permite reducir el consumo más aún si la utilización del canal no es completa, ya que el bus permanece en estado de letargo durante más tiempo.

4.3. SELECCIÓN PASIVA POR DIRECCIONAMIENTO SÍNCRONO

En el esquema anterior aún persiste una penalización debida al encendido de todos los esclavos durante un lapso de tiempo breve para evaluar la dirección recibida. Este mecanismo podría evitarse con *hardware* especializado: la UART debería poder programar la dirección ante la cual responder. Sin embargo, se está usando una serialización asíncrona en la que no se transmite el reloj de datos. Por tanto, es necesario disponer de relojes en cada esclavo, lo cual supone un consumo debido a los osciladores.

Otra estrategia consiste en transmitir la dirección de manera síncrona y aportando el reloj por un par de líneas aparte. Se debe disponer de una electrónica muy sencilla que reciba de forma síncrona la dirección con la ayuda del reloj y que despierte sólo el esclavo adecuado, que hasta entonces está en modo de ultra bajo consumo. La electrónica de recepción de la dirección se puede implementar en una PLD de muy bajo consumo. El

montaje se muestra en la figura 7. Notar que este montaje mejora los consumos en el

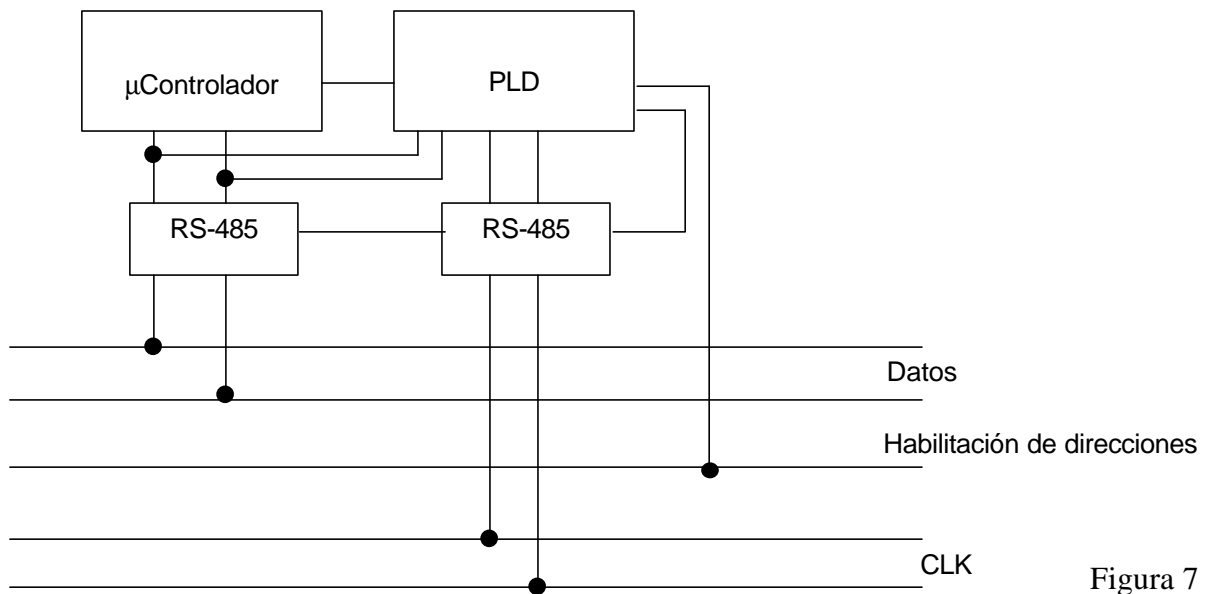


Figura 7

sentido de encender sólo lo necesario, pero duplica los consumos estáticos al duplicar el número de líneas RS-485.

En la tabla siguiente se dan los consumos calculados suponiendo que la PLD usada es una CXR3032 de Xilinx (elegida por su muy bajo consumo en reposo). El reparto de tiempos es análogo al caso 4.1.

Esclavo	Lectura		Escritura	
	MAX3471	MAX1483	MAX3471	MAX1483
Direccionado	5.260,56	11.954,86	351,87	400,93
No direccionado	42,72	48,04	42,72	48,04
Todos	16.153,85	24.204,75	11.245,16	12.650,82

Tabla 3: Selección por direccionamiento síncrono (Todos los datos en microamperios)

Al igual que en el caso anterior, para ocupaciones del bus por debajo del 100% esta solución se hace más atractiva, al reducirse el consumo medio. Sin embargo, los resultados obtenidos son superiores que en el caso anterior, aunque sería posible invertir la situación con una electrónica de decodificación de direcciones especialmente diseñada, ya que los consumos de la electrónica programable suelen ser superiores.

5. CONCLUSIONES

Tras analizar varios buses del mercado, se han estudiado distintas técnicas y tecnologías encaminadas a la obtención de un bus de campo con capacidad equivalente a los existentes, pero con requerimiento de mínimo consumo.

Las ventajas de un bus de estas características van desde la simplificación de los elementos de la alimentación, al reducir su tamaño y necesidad de disipación de potencia, a la apertura de nuevas aplicaciones, como sistemas alimentados por baterías.

Además, aunque inicialmente se ha diseñado el bus para un entorno de reducidas dimensiones y, por lo tanto, para pequeñas distancias, la reducción del consumo implica menores caídas de tensión en cables largos, por lo que en futuros trabajos se estudiará la viabilidad de la extensión del bus para cubrir mayores distancias, como las de los sistemas de control de regadíos.

Los resultados obtenidos por simulación son esperanzadores. El consumo eléctrico del sistema de comunicaciones, excluyendo el necesario para el maestro es de 9 miliamperios para 255 esclavos conectados al bus, realizando lecturas de 9 *bytes* continuamente a una tasa de 64 Kbps y para el peor caso (suponiendo que los datos transmitidos son AA₁₆).

Para lograr estas cifras se ha usado una arquitectura muy simple con protocolos optimizados, funcionando sobre *transceivers* de ultra bajo consumo. El sistema tiene topología bus con arquitectura maestro esclavo. El propio bus aporta energía a los esclavos a través de hilos independientes.

Además, se pueden esperar mayores reducciones del consumo, simplemente mejorando determinados aspectos como la serialización: el empleo de una UART tradicional introduce una ineficiencia del 20% debido a los *bits* de inicio y parada en cada *byte* a transmitir.