

DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE UN PROTOCOLO PARA RED DE INSTRUMENTACIÓN

ALDEMAR FONSECA VELÁSQUEZ*
RAFAEL FINO SANDOVAL**

1. Introducción

Cuando se habla de protocolos para redes de datos se piensa en gran cantidad de posibilidades que la tecnología de hoy nos presenta: TCP/IP, Ethernet, RDSI, ATM, Frame Relay, H323 y muchos más. Un subconjunto de esa gama son los protocolos para redes de datos a nivel de enlace¹, que son los encargados de realizar las conexiones físicas y lógicas entre los dispositivos que hacen parte de la red. Específicamente los que se aplican en redes industriales constituyen un campo de trabajo poco explorado y muchas veces completamente desconocido.

Los protocolos para redes industriales son tan antiguos como los de las redes corporativas pero, comparativamente, su desarrollo ha sido menor, quizás debido a la imposibilidad de obtener estándares aceptados por todos los usuarios mundiales de redes industriales: fabricantes de instrumentación y controles industriales, equipos de automatización, módulos de fabricación flexibles, software de supervisión y otros.

El mayor acercamiento que se tiene para lograr un estándar mundial es la norma IEC1158, que define el nivel físico y parte del nivel de enlace de las redes industriales. En este artículo se propone un protocolo que se ha desarrollado dentro del proyecto de investigación R.I.S.P.² y que podría convertirse en base de una plataforma para supervisión y control de plantas de procesamiento industriales donde se manejen muchas variables.



PALABRAS CLAVES

**INSTRUMENTACIÓN
INDUSTRIAL, REDES DE
COMUNICACIÓN, REDES
INDUSTRIALES, PROTOCOLOS
DE RED**

* Ingeniero Electrónico Universidad Distrital F.J.C., estudios de Maestría en Teleinformática, Director proyecto de investigación: «Diseño de una Red de Instrumentos para Supervisión de Procesos». Profesor adscrito a la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital. E-mail: aldemarf@hotmail.com.

** Ingeniero Electrónico y Especialista en Telemática Universidad Distrital F.J.C.

¹ 2º Nivel dentro del modelo de referencia OSI.

² R.I.S.P., Red de Instrumentos para Supervisión de Procesos.

2. Antecedentes

Una de las formas más antiguas (aún utilizada) de comunicar datos provenientes de dispositivos es la utilización de enlaces punto a punto basados en la interfaz RS232. Este estándar fue emitido inicialmente en 1960 por la EIA/TIA³, y años más tarde empezó a ser incorporado en los dispositivos industriales. La interfaz tiene varias limitantes que no lo hacen muy atractivo a nivel industrial, como la conexión punto a punto, su velocidad, distancia y la susceptibilidad al ruido. Como parte de la historia (aún hoy vista) se puede mencionar la forma de transmisión analógica, en la cual la señal viaja del sensor al centro de control por medio de un bucle de corriente de 4-20mA, con el problema de que sólo permite conectar un dispositivo por bucle y que la señal está propensa a ruido e interferencia durante su recorrido.

Más adelante nació la idea del bus de datos, es decir, un medio de comunicación que, mediante uno o dos pares de alambre recorriendo toda la planta de proceso, pudieran recogerse los datos emanados de todos los dispositivos conformantes de la red. Los inquietos fabricantes de tecnología industrial acomodaban según su criterio una posibilidad de comunicaciones en los dispositivos, tratando de cumplir con la idea inicial del bus de comunicaciones pero sin preocuparse por la compatibilidad. La IEC emitió el primer intento de estándar en cuanto a redes industriales y fue el concepto de *bus de campo*; por medio del trabajo del grupo IEC (TC65C-WG6) definió las especificaciones generales de un bus de campo que posteriormente dieron origen a la norma IEC1158. En la Tabla 1 relacionan las características más sobresalientes de esta norma.

Nivel físico. Bus serie controlado por un maestro, comunicación semidúplex trabajando en banda base.	Velocidades. Un Mbit/s para distancias cortas, o valores inferiores, entre 250 Kbits/s a 64 Kbits/s para distancias largas.
Longitudes. 40 m para la máxima velocidad y 350 m a velocidades más bajas.	Número de periféricos. 30 nodos como máximo, con posibles ramificaciones hasta un máximo de 60 elementos.
Tipo de cable. Pares de cables trenzados y apantallados.	Conectores. Bornes tipo industrial o conectores tipo D9 o D25.
Conexión/desconexión "on line". La conexión y/o desconexión de algún nodo no debe interferir el tráfico de datos.	Topología: Bus físico con posibles derivaciones hacia los nodos o periféricos.
Longitud de ramificaciones. Máxima longitud de las derivaciones de 10 m.	Aislamiento. 500 V CA permanentes entre elementos de campo y bus. Tensión de prueba 1500 V CA/1 minuto
Seguridad intrínseca. Opción a conectar elementos de campo con tensiones reducidas para atmósferas explosivas	Alimentación. Opción de alimentar los elementos de campo a través del bus.
Longitud de mensajes. Mínimo 16 bytes por mensaje.	Transmisión de mensajes. Posibilidad de diálogo entre cualquier par de nodos sin repetidor. Esto no excluye, sin embargo, la posibilidad de que la comunicación se haga a través de un maestro ni tampoco excluye el empleo de repetidores "transparentes" para incrementar las distancias de transmisión.
Maestro flotante. Posibilidad de maestro flotante entre diversos nodos.	Implementación de protocolo. Los circuitos integrados que implementen el protocolo deben estar disponibles comercialmente y ser de dominio público (no protegidos por patentes de exclusividad).

Tabla 1. Especificaciones de la Norma IEC1158

³ EIA/TIA, Electronic Industries Association / Telecommunication Industries Association.

Las especificaciones dadas en ella cubren sólo el Nivel 1, es decir, el nivel físico del modelo de referencia OSI, y fueron tan generales que efectivamente ha surgido toda una variedad de buses de campo, de diferentes grupos de fabricantes a nivel mundial, que cumplen con éstas especificaciones y que sin embargo están aún muy lejos de ser compatibles.



El *bus de campo* constituye el nivel más simple y próximo al proceso dentro de la estructura de comunicaciones industriales. Está basado en procesadores simples y utiliza un protocolo mínimo para gestionar el enlace entre ellos; los más recientes permiten la comunicación con buses jerárquicamente superiores y más potentes. En él se engloban las siguientes partes:

- *Estándares de comunicación:* cubren los niveles físico, de enlace y de aplicación, de acuerdo con el modelo de referencia OSI (Open Systems Interconnection)

- *Conexiones físicas:* las especificaciones de determinado bus admiten en general más de un tipo de conexión física. Las más comunes son semi-dúplex (comunicación en banda base tipo RS-485), RS-422 y conexiones en bucle de corriente

- *Protocolo de acceso al medio (MAC) y de enlace (LLC):* consiste en la definición de una serie de funciones y servicios de la red mediante códigos de operación estándar.

- *Nivel de aplicación:* es el dirigido al usuario, apoyándose en las funciones estándar antes mencionadas para crear programas de gestión y presentación. La aplicación suele ser propia de cada fabricante, permitiendo a lo sumo la programación en un lenguaje estándar.

Algunas de las propuestas de bus de campo más populares y su comparación se resumen en la siguiente tabla:

Sampling of Industrial Networks					
Network	Introduced	Topology	Data transfer size	Speed	Original technology developer*
I	Fall '93	Bus, ring, tree star, or all	31 slaves w/4 in, 4 out	167 kbps	Consortium
Nopen	'92	Trunkline or dropline	8-byte, variable message	1 Mbps, 500 kbps, 250 kbps, 125 kbps	Philips/CiA
ntrolNet	'97	Trunkline, tree, star	510 bytes	5 Mbps	Allen-Bradley
viceNet	3/94	Trunkline or dropline with branching	8-byte variable messaging	500 kbps, 250 kbps, 125 kbps	Allen-Bradley
ldbus undation	'95	Multidrop with bus-powered devices	16.6 M objects/device	31.25 kbps, 1 Mbps, 2.5 Mbps	Consortium
IEC/ISA SP50 ldbus	'92-96	Star or bus	64 octets high and 256 low priority	31.25 kbps IS+1, 2.6, 5 Mbps	Committee/consortium
erbus	'84	Segmented with "T" drops	512 bytes h.s., unlimited block	500 kBits/s, full duplex	Consortium
nWorks	3/91	Bus, ring, loop, star	228 bytes	1.25Mbps full duplex	Echelon Corp.
fibus	DP-'94; PA-'95	Line, star, ring	244 bytes	DP up to 12 Mbps; PA 31.25 kbps	Consortium Siemens
S	1/94	Trunkline or dropline	8-byte variable messaging	1Mbps, 500 kbps, 250 kbps, 125 kbps	Honeywell

Fuente: Información tomada de la web de Synergetic Micro System

Tabla 2. Comparación entre Diferentes Buses de Campo

Cabe resaltar que el grupo del IEC 61158 ha seguido trabajando para consolidar un nivel de enlace (DLL Data Link Layer) reconocido a nivel mundial, que finalice con la confrontación y permita el desarrollo de los niveles superiores. En este nuevo esfuerzo hay dos corrientes dominantes: la que lidera el bus de campo *FieldBus Foundation* y la que lidera *Profibus*. Al parecer todo apunta a realizar un estándar con base en las ventajas de las dos propuestas con mayor inclinación hacia *FieldBus Foundation*, que sería el *WorldFIP (Factory Information Protocol)*.

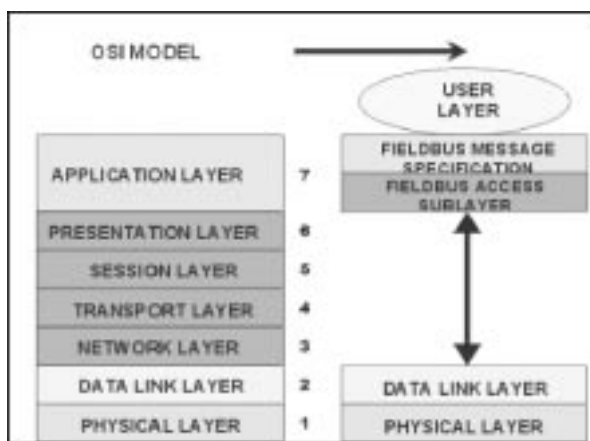


Figura 1. Comparación: Modelo OSI vs Bus de Campo

El concepto de bus de campo se enriquece día a día. Ahora se habla de él como una arquitectura de comunicaciones de varios niveles, desde la recolección de los datos de proceso hasta el nivel de gestión de la información seleccionada. Comprende hardware de comunicaciones (cables, conectores, tarjetas de interfaz y adaptadores); y software (algoritmos de control de enlace, de errores, de flujo, protocolos a nivel de aplicaciones de red y todo el software de supervisión).

3. Componentes de la Red

3.1 Nivel Físico

El nivel físico desarrollado para el protocolo en el proyecto se fundamenta en la norma IEC1158. La Tabla 3 muestra las principales características de este nivel.

- **Especificación del Conector.** No está normalizado por la IEC115. En este caso corresponde a la norma europea DIN 19245 y hace parte de la especificación de algunos buses de campo como Profibus (ver Figura 2)
- **Topología física de la red.** Presenta un esquema de bus de campo en el cual hay un medio compartido por todos los participantes de la red, por lo cual debe establecerse una metodología o protocolo de arbitramento. El medio físico es cable par trenzado, preferi-

Conector	DB9-F EN CHASIS DB9-H EN PATCH CORD
Línea	BALANCEADA RS-485
Topología	BUS MAESTRO-ESCLAVO
Cable	UTP NIVEL 5
Distancia Max	500m
Velocidad	9600 BPS
Interfaces	HOST - RED: TARJETA MAESTRA RS232-RS485 INST. EXTERNO - RED: TARJETA EMB. RS232-RS485
Niveles De Voltajes	CERO LOGICO: $VDO^+ - VDO^- = -2,5V$ UNO LOGICO: $VDO^+ - VDO^- = +2,5V$
Impedancia Línea	120 OHMIOS

Tabla 3. Especificaciones del Nivel Físico del Protocolo según norma IEC1158

blemente apantallado (STP), en una línea balanceada con una impedancia característica de 120W; soporta tasas de transferencia hasta 1Mbps y alcanza distancias hasta de 1000m sin repetidor.

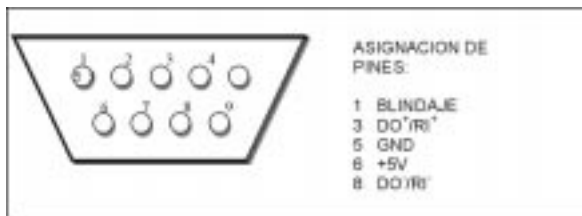


Figura 2. Diagrama de pines del conector, según el protocolo

La Figura 3 ilustra la topología de la red. En ella se observa un bus común a todos los equipos conectados a la red, con puntos sencillos o cajas de conexión; cada equipo se conecta al bus. También se muestra la posible jerarquía de control sobre el bus; en este caso existe un equipo maestro que se encargará de administrar la utilización del bus; los demás son equipos esclavos que sólo atienden órdenes del maestro.

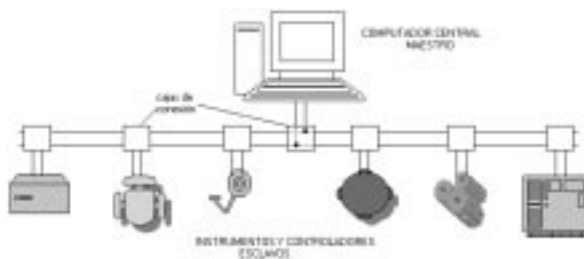


Figura 3. Topología de la red

En el contexto de la topología física de la red pueden mencionarse los elementos activos que implementan el funcionamiento del protocolo; ellos son:

- Una interfaz, denominada *interfaz maestra*, que conecta al computador central con la red. Además de servir de puente entre el RS-232 y el RS-485, esta tarjeta es la que realmente implementa el protocolo y controla los enlaces con los instrumentos

- Cada uno de los instrumentos incorporados al proyecto se denomina *instrumento local*; ellos tienen internamente la interfaz de comunicaciones con la red integrada en su sistema, con salida RS-485 a nivel físico; ella entiende el protocolo de nivel de enlace desarrollado
- Los instrumentos de otros fabricantes se denominan en adelante *instrumentos externos*. Ellos tienen la posibilidad de conectarse a la red por medio de la denominada *interfaz esclava*, la cual tiene una estructura idéntica a la interfaz maestra, diferenciada sólo a nivel del firmware, que les permite comportarse como maestra o esclava. Para poderse conectar a la red los instrumentos externos deben cumplir con dos condiciones: tener una salida de datos por medio de una interfaz RS-232 y responder a una solicitud de datos con un comando de máximo 14 caracteres por la misma vía. Por ejemplo, el osciloscopio Hitachi Modelo 5460 responde al comando “:MEASURE:VPP?”, con el dato del voltaje pico a pico del canal activo
- El *bus de datos* es un par de hilos (UTP o STP) que recorren y conectan a los participantes de la red, como lo indica la Figura 4. Por la nominación usada en los circuitos integrados que accesan a la red (SN75176B) de todas las interfaces, las señales del bus se denominaron *DO+/RI+* y *DO-/RO-*; ellas son diferenciales, como corresponde a una línea balanceada, con una impedancia característica de 120W aproximadamente; también deben existir terminaciones de línea en los extremos del bus, es decir, cargas de 120W.



Figura 4. Interconexión entre componentes de la red

- La Figura 5 muestra la aplicación típica del circuito integrado SN75176B, que sirve de interfaz física a la red RS-485. "RT" es la carga de terminación en los extremos. Ade-

más de observar los amplificadores de entrada y salida de cada módulo, hay uno de amplificación de señal para lograr distancias mayores.

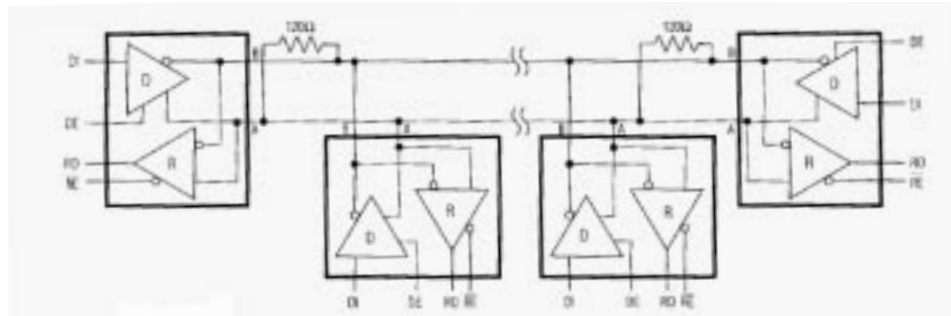


Figura 5. Conexión entre los transceptores en el bus

3.2. Nivel de Enlace

- **Formato de trama**

DIRECCIÓN DESTINO	DIRECCIÓN ORIGEN	CAMPO DE CONTROL	LONGITUD	CAMPO DE INFORMACION	CRC-1	CRC-1
-------------------	------------------	------------------	----------	----------------------	-------	-------

Figura 6. Formato de trama

- *Dirección destino:* campo de 1 byte para identificar el receptor de la trama
- *Dirección origen:* campo de 1 byte para identificar el transmisor de la trama
- *Campo de control:* campo de 1 byte que determina la función a realizar
- *Campo de longitud:* campo de 1 byte para indicar la cantidad de bytes de información
- *Campo de información:* campo de 1 a 256 bytes que contienen la información o datos
- *Campo de CRC-1 y 2:* campo de 2 bytes para chequeo de error por medio del CRC-16

hasta 32 participantes sin repetidor en un segmento de bus.

El campo de longitud determina que el tamaño máximo del campo de información es de 256 bytes y el tamaño máximo de la trama queda determinado en 262 bytes.

- **El campo de control.** Se usa para identificar la función que realizará la trama. Para ello se han definido algunos códigos importantes que se enumeran en la Tabla 4.

De acuerdo con la definición de la trama pueden direccionarse hasta 256 participantes en la red. Sin embargo, hay que recordar la definición básica de la norma RS-485, que determina las características físicas del bus de campo, y da la posibilidad de conectar

Valor Hex.	Carac. ASCII	Función
77	w	Solicitud de datos
88	ê	Respuesta a solicitud de datos
EE	-	Configuración de esclavo
5 ^a	z	Configuración de tarjeta maestra
26	&	Respuesta de un esclavo sin datos
AA	¬	Comando a instrumento
06	ACK	Respuesta sin datos

Tabla 4. Códigos de control

3.3 Interfaz Maestra

- **Estructura general.** La interfaz maestra es la tarjeta que contiene el protocolo y que sir-

ve de puente entre el computador central y la red. Se desarrolló con un microcontrolador PIC16F628 y su estructura básica se muestra en la Figura 7.

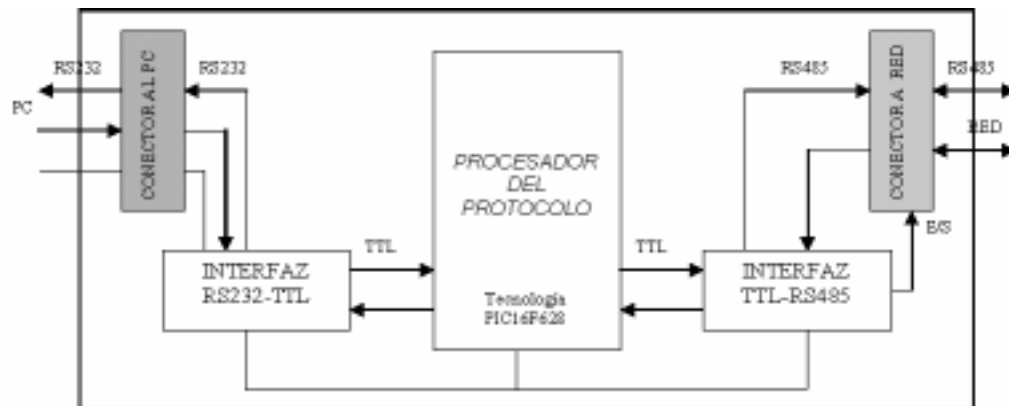


Figura 7. Estructura de la Interfaz Maestra

La interfaz presentada en la Figura 7 tiene conexión al puerto serial del computador central y a la vez a la red de instrumentos. Como paso intermedio se usa un microcontrolador, para hacer el procesamiento del protocolo y descargar al computador de la función de estar pendiente de la red. Ella cumple los siguientes objetivos:

- Convertir a nivel físico de RS232 a RS485. Esto implica tres conversiones: a) Niveles de voltaje: de +/- 10V (RS232) a +/- 2,5V (RS485); b) Transferencia: de full dúplex (RS232) a half dúplex (RS485); c) Línea no balanceada (RS232) a línea balanceada (RS485)
- Calcular y verificar el campo de chequeo de error CRC
- Hacer el control de acceso al medio, por medio del protocolo y mediante las órdenes del computador central
- **Memorias (buffers) de comunicación.** En la tarjeta maestra, dentro del microcontrolador, se han separado dos segmentos de memoria: uno almacena la trama que viene del computador hacia el bus y el otro almacena la trama del bus hacia el computador. Para

las operaciones de lectura y escritura de los dos segmentos de memoria se usan cuatro apuntadores independientes.

Para las tramas se han separado inicialmente 20 posiciones por cada segmento. Esto significa que por el momento se tendría un tamaño máximo de trama de 20 bytes. Esta es una restricción de tec-

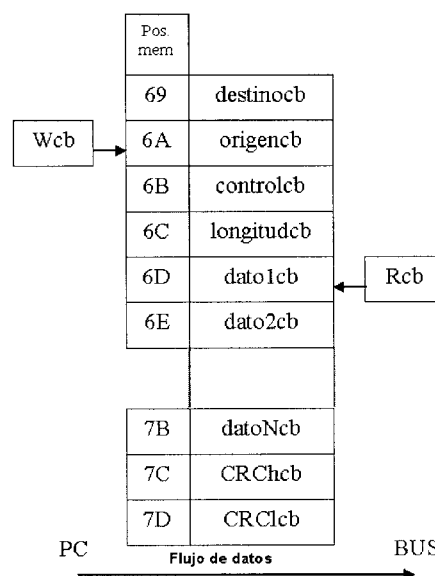


Figura 8. Memoria Computador - Bus

nología, no de protocolo, pues como se definió antes, el tamaño total de trama podría ser de 262 bytes; sin embargo con esta tecnología se podrían lograr tamaños hasta de unos 70 bytes por trama.

Las Figuras 8 y 9 muestran los dos segmentos de memoria separados para almacenar las tramas, según el sentido de la información. El primer segmento, desde la posición de memoria 69 hasta la 7D, almacena la trama del computador al bus; él se maneja con dos apuntadores: *Wbc* es el apuntador que direcciona la posición de memoria a escribirse desde el computador y *Rbc* el que direcciona la posición de memoria a leerse hacia el bus. El segundo segmento, desde la posición de memoria 54 hasta la 68, almacena la trama de bus al computador y usa dos apuntadores: *Wcb* para escribir desde el bus y *Rcb* para leer hacia el computador.

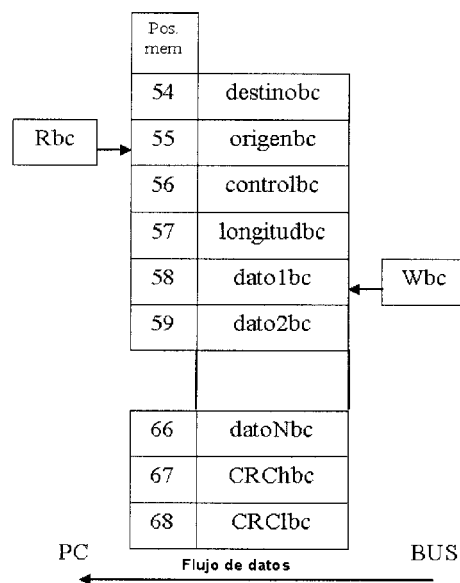


Figura 9. Memoria Bus-Computador

- **Dos UART: una hardware y otra software.** El microcontrolador (PIC16F628) tiene un módulo UART⁴; sin embargo, como se observa en la estructura de la interfaz, se necesitan dos módulos: uno para comunicarse con

el computador y el otro que se comunica con la red. Por tanto es necesario implementar el otro módulo UART bit a bit por firmware, usando dos pines de puerto para las operaciones de transmisión y recepción.

En esta interfaz se empleó el módulo UART interno de hardware para comunicarse con el computador en operación full dúplex. En el microcontrolador este módulo tiene varias características especiales; algunas se listan a continuación:

- Velocidad variable por medio del generador de baudios interno SPBRG
- Verificación y cálculo del 9º bit (paridad); en este caso no se usa
- Buffer de transmisión y recepción separados
- Interrupción de recepción cuando detecta un byte en el buffer
- Interrupción de transmisión cuando detecta vacío el buffer de transmisión
- Operación full dúplex (simultáneamente puede transmitir y recibir)
- Formato de datos según el estándar RS232: 1 bit de Start, 7 ó 8 bits de datos, bit de Paridad y 1 ó 2 bits de Stop.

El módulo implementado por firmware se usó para la comunicación con la red en operación half-dúplex. Este se desarrolló con las siguientes características, realizando una analogía con el módulo anterior:

- El tiempo de bit, y por tanto la velocidad, se obtienen a partir de la interrupción por el timer 0, el cual se debe reiniciar con un tiempo de bit cada vez que se cumple
- No se implementó el 9º bit
- Sólo se tiene un registro que hace parte de la RAM como buffer de recepción y transmisión

⁴ Universal Asynchronous Receiver Transmitter, o Transmisor y Receptor Asíncrono Universal.

- La interrupción de recepción se genera con el flanco de bajada del bit de Start, es decir, la recepción está conectada a la entrada de interrupción externa. Los siguientes bits son recibidos por la interrupción del timer 0, y la interrupción por flanco se deshabilita. Finalmente, después de los 8 bits de datos se espera tener en el siguiente un bit de Stop (estado alto de la línea).

3.4 Interfaz Esclava

- **Estructura general.** Como se ha dicho, en hardware la tarjeta es idéntica a la maestra; la diferencia se encuentra en el rol que desempeña dentro de la red. Al igual que la tarjeta maestra, contiene el protocolo y sirve de puente entre la red y un instrumento externo; se desarrolló con un microcontrolador PIC16F628 y su estructura básica se muestra en la Figura 10. De un lado, la interfaz se conecta al puerto serie del instrumento externo, y de otro se conecta al bus de datos de la red. Como paso intermedio se usa un microcontrolador para hacer el procesamiento del protocolo y transferir los datos del instrumento hacia el bus de datos.

La interfaz esclava cumple los siguientes objetivos:

- Convertir a nivel físico de RS232 a RS485. Esto implica tres conversiones: a) Niveles de voltaje: de +/- 10V (RS232) a +/- 2,5V (RS485); b) Transferencia: de full duplex (RS232) a half duplex (RS485); de línea no balanceada (RS232) a línea balanceada (RS485)
- Calcular y verificar el campo de chequeo de error CRC
- Hacer el control de acceso al medio, por medio del protocolo en el rol de esclavo y responder a las solicitudes del computador central que recibe por medio de la red.
- **Memorias (buffers) de comunicación.** Hay dos segmentos de memoria: uno para almacenar la trama que se recibe desde el bus de datos hacia el instrumento y el otro almacena la trama que va del instrumento hacia el bus de datos. Para las operaciones de lectura y escritura de los dos segmentos de memoria se usan cuatro apuntadores independientes.

Para las tramas se tienen inicialmente 20 posiciones por cada segmento, lo que significa que por

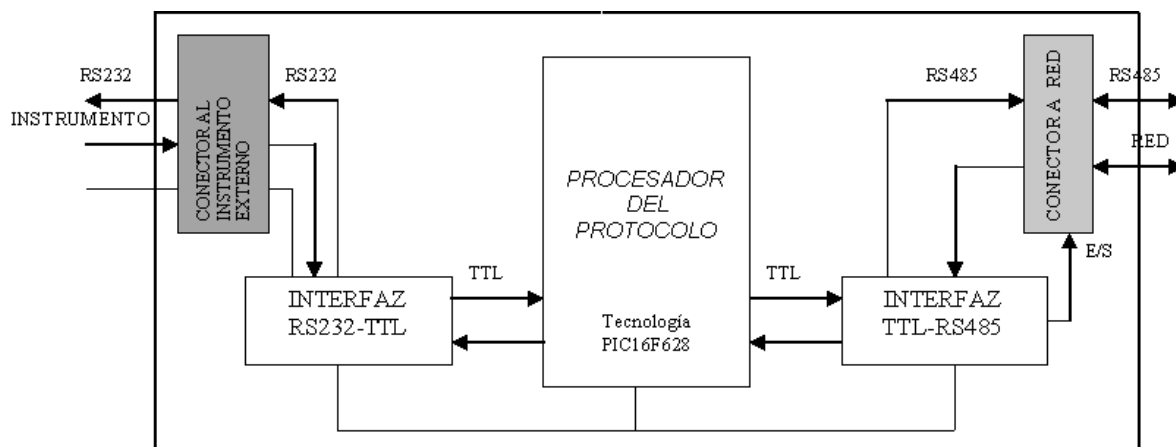


Figura 10. Estructura de Interfaz Esclava

el momento se tendría un tamaño máximo de trama de 20 bytes. Como en el caso anterior, se trata de una restricción de tecnología y no de protocolo. Con esta tecnología se podrían lograr tamaños hasta de unos 70 bytes por trama.

Las Figuras 11 y 12 muestran los dos segmentos de memoria separados para almacenar las tramas, según el sentido de la información. El primer segmento, desde la posición de memoria 69 hasta la 7D, almacena la trama transferida en el sentido instrumento hacia el bus; se maneja con dos apuntadores: *Wbi* es el apuntador que direcciona la posición de memoria a escribirse desde el instrumento (los datos que vienen del instrumento externo) y *Rbi* el que direcciona la posición de memoria a leerse hacia el bus. El segundo segmento, desde la posición de memoria 54 hasta la 68, almacena la trama en el sentido bus hacia el instrumento y usa dos apuntadores: *Wib* para escribir desde el bus y *Rib* para leer hacia el instrumento externo.

- **Dos UART: una hardware y otra software.** Al igual que en la interfaz maestra, se tienen dos módulos de comunicaciones UART: uno para comunicarse con el instrumento externo y el otro que se conecta al bus de datos. Uno de los módulos es interno al microcontrolador y el otro es implementado por firmware, usando dos pines de puerto para las operaciones de transmisión y recepción. La descripción es similar a la que se hizo para la tarjeta maestra⁵.

4. Protocolo de Enlace

4.1 Descripción del Protocolo

Considerando que el medio físico de comunicación es compartido (dos conductores en bus balanceado), la transferencia será half duplex, lo

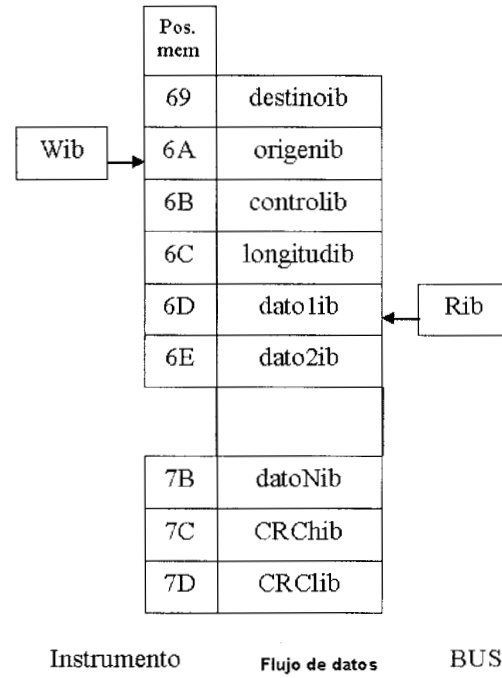


Figura 11. Memoria Instrumento-Bus

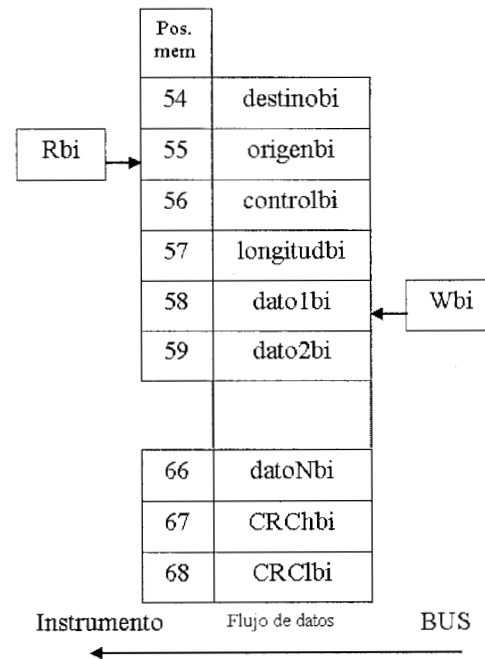


Figura 12. Memoria Bus-Instrumento

⁵ Ver sección análoga en Interfaz Maestra.

cual implica la necesidad de un protocolo de arbitramento del medio.

Se implementó un método de acceso al medio tipo polling; en determinado momento hay una estación maestra que tiene el control del bus de comunicaciones y las demás estaciones tienen el rol de esclavas, dependientes de la estación maestra para comunicar. La secuencia de acciones que gobiernan el protocolo es muy sencilla y se describe a continuación.

- **Funcionamiento normal.** La estación maestra envía solicitudes de datos de acuerdo con una agenda de encuesta que debe cumplir. Cada solicitud lleva el formato mínimo de trama, donde generalmente no se incluyen datos:

Trama solicitud: I M w 0 CRC1 CRC2

I es la dirección del instrumento esclavo a quien se le pregunta por el dato más reciente. M es la dirección del maestro que le está haciendo la encuesta. El control *w* indica solicitud de datos y la longitud en 0 implica que la trama no lleva datos.

El instrumento encuestado debe responder, antes del tiempo correspondiente a la transmisión de dos bytes (por ejemplo, a 9600bps sería 2,08ms),

con una trama donde se incluya en el campo de información el dato más reciente que tiene en su buffer de datos. En caso que el instrumento no tenga un nuevo dato respecto al último que se transfirió, contestará con una trama de reconocimiento sin datos, que se ha denominado *Trama 0*:

Trama de respuesta sin datos, Trama 0:
M I & 0 CRC1 CRC2

La otra situación posible es que el instrumento tenga un dato nuevo y proceda a transmitirlo; en este la trama de respuesta se denomina *Trama F*. Un ejemplo es como sigue:

Trama de respuesta con datos, Trama F:
M I ê 5 2 3 . 4 0 CRC1 CRC2

Se observa que el campo de control tiene el código *ê*, que indica respuesta a solicitud con datos; el campo de longitud tiene el valor 5, indicando un dato con esta cantidad de bytes; y por último, el dato transmitido en este ejemplo es 23.40.

Una vez recibida por parte del maestro la respuesta, deja libre el bus durante un tiempo de dos bytes, denominados *dos bytes de silencio en el bus*. En seguida procede a realizar la siguiente encuesta de acuerdo con la agenda respectiva.

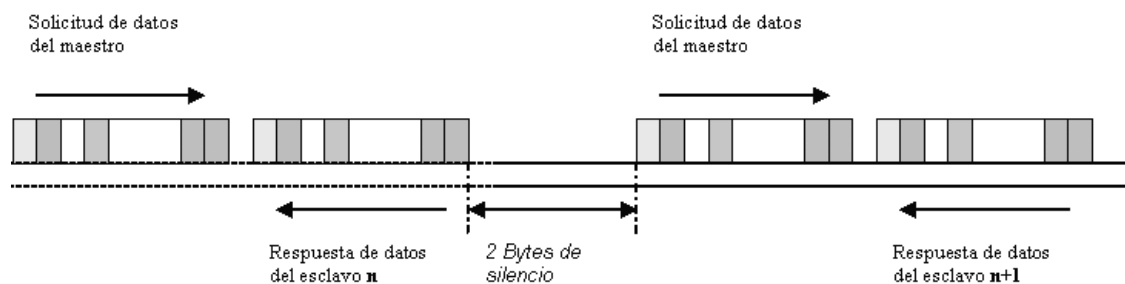


Figura 13. Protocolo de enlace Funcionamiento Normal

Normalmente cada instrumento está escuchando el bus; cuando detecta un flanco de bajada entra al estado de recepción de trama. Sin embargo, si al recibir la dirección de destino (el primer campo que recibe), éste no coincide con su dirección local, entonces se sale de este estado y entra a

uno donde espera los dos bytes de silencio del bus para volver a recibir otra trama.

- **Casos de excepción.** Hay varias situaciones que podrían presentarse, fuera del funcionamiento normal descrito anteriormente. A continuación se describen los más relevantes:

a) **El esclavo no responde o no recibe una trama correcta.** En el caso en que después de enviarse una petición por parte del maestro el esclavo correspondiente no responde en un lapso de dos bytes el maestro procede a encuestar el siguiente esclavo, de acuerdo con la agenda respectiva. El maestro también tendrá en cuenta esta dirección de esclavo, y en el caso en que por tres ocasiones seguidas

se le encueste y no responda se sacará de la lista de instrumentos activos y se observará en pantalla un mensaje de alerta. El esclavo podría no responder por dos situaciones: porque no está funcionando correctamente, o porque la trama no le llega correctamente por problemas de comunicaciones. Cualquiera de las dos situaciones amerita que el administrador de red revise la situación específicamente.

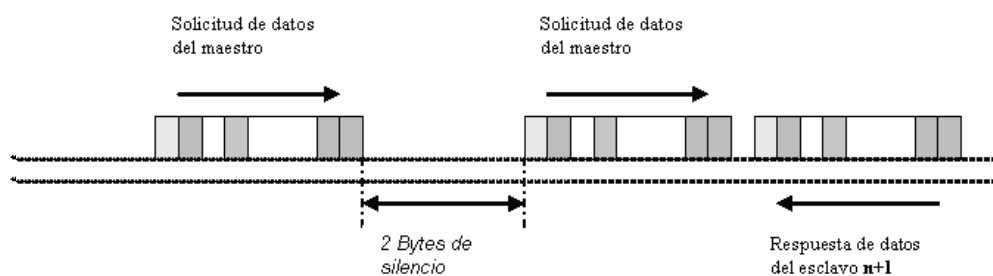


Figura 14. El Instrumento n (esclavo n) no responde

b) **El maestro no recibe una trama de respuesta correcta.** Esta situación es equivalente a la anterior, es decir, a que el esclavo encuestado no hubiere respondido. Sin embargo la diferencia está en que si ésta se presentara con todos los esclavos, por ruido o colisiones en el bus, la señal de alerta que se observa en pantalla será para indicar que hay proble-

mas con las comunicaciones entre el maestro y la red.

Igualmente, el maestro no toma en cuenta las tramas donde la dirección de destino no corresponde con la dirección local del maestro, ni las tramas donde después de verificar el CRC se tiene una trama con errores.

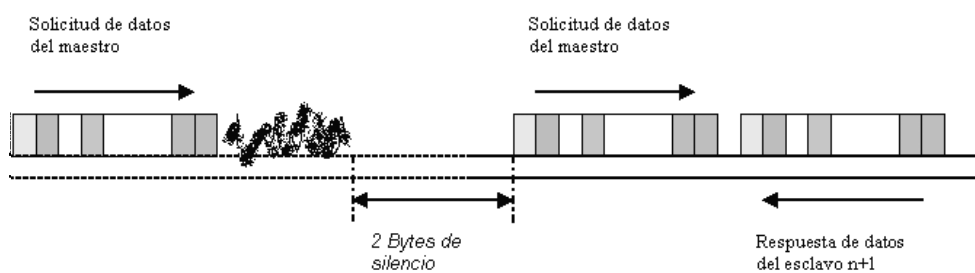


Figura 15. El maestro no recibe respuesta correcta

En cualquiera de éstas situaciones el maestro espera que el bus se encuentre libre durante un poco más de dos bytes y pro-

cede a encuestar al siguiente esclavo, de acuerdo con su agenda.

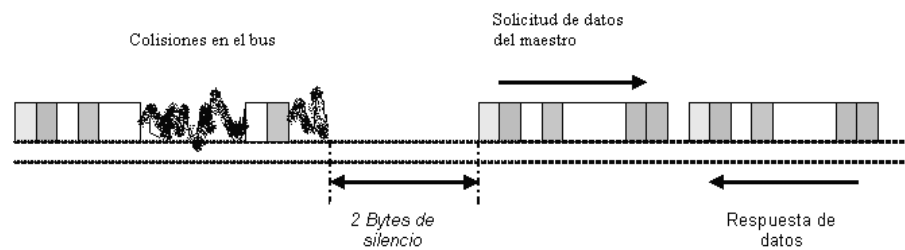


Figura 16. Se presentan colisiones en el medio

c) **Colisiones en el medio.** Como se ha descrito anteriormente el medio físico es compartido y se trata de una línea balanceada que se usa en modo half duplex. Por lo tanto es preciso que dos participantes no tengan sus salidas habilitadas simultáneamente en ningún momento.

Normalmente todos los esclavos se deben encontrar en estado de entrada (alta impedancia en la línea) y el maestro toma el control del bus para hacer la encuesta. Cuando termina de transmitir la trama de encuesta, el maestro se coloca en modo de entrada dejando la línea libre para que el esclavo encuestado tome el control. Así mismo, cuando el esclavo termina de transmitir la trama de respuesta deja la línea libre. Sin embargo, es posible que se presenten colisiones en el medio por situaciones tales como: instrumentos funcionando incorrectamente, interfaz maestra de comunicaciones fuera de sincronismo, ruido en la línea, un nuevo esclavo que entra a la red y no se sincroniza correctamente, etc.

Al igual que en el caso anterior, en esta situación el maestro esperará a que sucedan dos bytes de silencio en la línea para encuestar al esclavo siguiente. Si las colisiones siguen debe verse una señal de alerta en pantalla. La Figura 17 presenta diagramas sagitales en el tiempo que muestran algunas secuencias del protocolo que se han venido describiendo en las secciones anteriores.

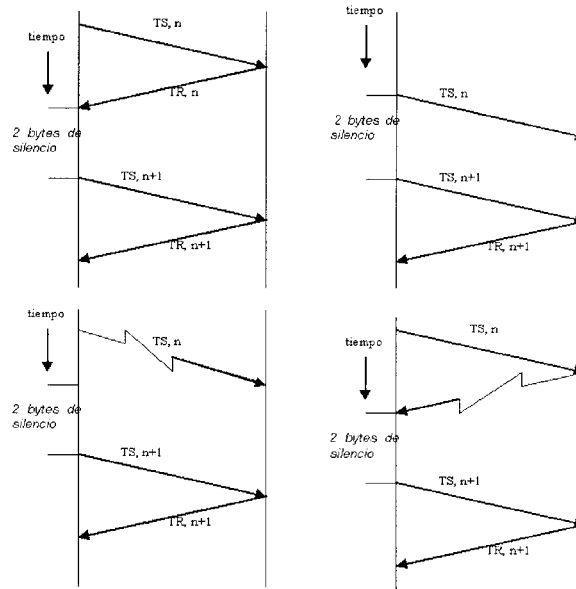


Figura 17. Diferentes secuencias del protocolo

4.2 Detección de Errores

Teniendo en cuenta que uno de los principales enemigos de la comunicación de datos es el ruido, es preciso prevenir los efectos que él podría tener sobre la información. La cantidad de errores en la transmisión de datos es inversamente proporcional a la relación señal a ruido (S/N). Esta relación disminuye con la atenuación causada por la trayectoria de la señal, acoplamientos e incidencia de señales externas, entre otras; cuando la relación señal a ruido disminuye la cantidad de errores aumenta, siendo inevitable que éstos se presenten. El desarrollo de las tecnologías de transmisión permite minimizar la cantidad de errores, pero no totalmente.

Así, sabiendo que al receptor pueden llegar errores que han afectado la información original, es preciso implementar un mecanismo para verificar si la información recibida los contiene. En una trama recibida podrían tenerse errores simples (un solo bit errado), errores dobles (dos bits errados) o errores múltiples (tres ó más bits errados).

Por ejemplo: Se pretende transmitir la cadena de 8 bits: 01011011
 Se configuró una paridad par, entonces el bit adicional de paridad será: 1
 De esta manera, información más paridad completan un número par de unos
 Si la cadena a transmitir es: 11010001
 El bit adicional de paridad será: 0

Existen muchos mecanismos para verificar errores en la información y todos suponen la adición de una información adicional que se denomina *redundancia*. El más simple es la *paridad* que consiste en asegurar la transmisión de un número par o impar de números uno, previo acuerdo entre el transmisor y el receptor.

- **Códigos de Redundancia Cíclica.** Son los códigos para detección de errores más usados en el momento; consisten en la aplicación de un polinomio generador sobre la información para obtener un residuo que será la redundancia agregada. Información y redundancia viajarán hacia el receptor; este a su vez recibirá todo y aplicará el mismo polinomio generador que usó el transmisor para calcular la

redundancia y obtener un residuo final que le permite verificar si hubo errores en la transmisión. De manera sencilla si el residuo es cero en el receptor la transmisión está libre de errores; para esta aplicación se ha usado el polinomio generador CRC16: $X^{16} + X^{15} + X^2 + 1$

- **Algoritmo para calcular el CRC16 en el transmisor**

1. Borra los 2 bytes de CRC
2. Transmite cada bit desde el menos significativo desplazándolo a través del CRC
3. Verifica el bit que sale del CRC cuando se desplaza:
 - a. Por cero vuelve el punto 2
 - b. Por uno hace XOR entre los bytes CRC1 CRC2 y el polinomio generador
4. Se repiten los pasos 1 al 3 hasta que se desplacen todos los bits de información, más 16 desplazamientos entrando un cero por la izquierda
5. Transmite los 16 bits del CRC sin efectuarle más operaciones

- **Trama de ejemplo en la parte de Transmisión.** Se transmite bit por bit la trama: 46 4D 77 00 (en Hexadecimal), calculándose los dos bytes: CRC1 y CRC2 como lo muestra la Ta-

bla 5. Cada fila representa la transmisión de 8 bits y su respectivo corrimiento y cálculo, de acuerdo con el algoritmo de transmisión.

TRAMA TRANSMITIDA				CRC1(L)	CRC2(H)
00	77	4D	46	00	00
	00	77	4D	46	00
		00	77	4D	46
			00	C5	49
				EF	C3
				F9	E9
				8F	FC

Tabla 5. Ejemplo del cálculo del CRC para transmisión

Estos últimos 2 bytes: **8F FC** (hexadecimal) deben ser transmitidos junto con la trama. La trama total queda entonces: 46 4D 77 00 FC 8F

• **Algoritmo para verificar el CRC16 en el receptor**

1. Borra los 2 bytes de CRC
2. Recibe cada bit desde el menos significativo desplazándolo a través del CRC
3. Verifica el bit que sale del CRC cuando se desplaza:
 - a. Por cero vuelve el punto 2
 - b. Por uno hace XOR entre los bytes CRC1 CRC2 y el polinomio generador
4. Se repiten los pasos 1 al 3 hasta que se desplacen todos los bits de información junto con los 2 bytes de redundancia que le han transmitido.
5. Verifica el contenido de los bytes CRC1 y CRC2. Si están en cero, la trama recibida es correcta, de lo contrario será descartada.

- **Trama de ejemplo: Parte de Recepción.** Se recibe bit por bit la trama: 46 4D 77 00 FC 8F (en hexadecimal), calculándose los dos bytes: CRC1 y CRC2, como lo muestra la

Tabla 6. Cada fila representa la recepción de 8 bits y su respectivo corrimiento y cálculo, de acuerdo con el algoritmo de recepción.

TRAMA RECIBIDA						CRC1(L)	CRC2(H)
8F	FC	00	77	4D	46	00	00
	8F	FC	00	77	4D	46	00
		8F	FC	00	77	4D	46
			8F	FC	00	C5	49
				8F	FC	EF	C3
					8F	05	E9
						00	00

Tabla 6. Ejemplo de la verificación del CRC en recepción

Como se observa el resultado final en los bytes CRC1 y CRC2 es 00, indicando una recepción libre de errores. Un resultado diferente de ceros en estos bytes evidencia una trama con errores.

5. Conclusiones

- En las redes industriales el *protocolo de enlace de datos* constituye la base del bus de campo. Cada propuesta de bus de campo contiene un protocolo bien definido para permitir que los dispositivos desarrollados bajo este concepto sean compatibles y puedan compartir información
- Los fabricantes de instrumentos, controladores, sensores, transmisores y otros dispositivos de aplicación industrial se acogen a una propuesta de bus de campo específico
- En nuestro caso se pretende influir, por medio del protocolo desarrollado en el proyec-

to, en el desarrollo local de instrumentación industrial para consolidar un estándar de bus de campo que permita disfrutar de las ventajas de las redes industriales

- En principio ya se han desarrollado cuatro instrumentos de buenas características con este protocolo implementado. El campo de aplicación y el propio progreso del protocolo irán en aumento en la medida que se generalice su utilización
- El protocolo es una de las partes que componen el diseño de una red para supervisión; otras partes son: la instrumentación y el software de aplicación
- Se han realizado pruebas y mediciones al protocolo, tales como tiempos mínimos de encuesta del orden de 30 ms, muestreo de señales hasta de 30 Hz, con velocidades de transferencia de 9600 bps.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- JONES, Vicent C. MAP/TOP Networking. Ed. McGraw-Hill, 1987
- PIMENTEL, Juan R. Communications Networks for Manufacturing, Ed. Prentice Hall Inc, 1990.
- NUSSBAUMER, Henri. Informatique Industrielle IV, Parte 2: Télénformatique. Presses Polytechniques Romandes, 1987
- RODRÍGUEZ F., CAMPELO J., SERRANO J.J. Apuntes de Redes de Area Local Industrial. DISCA, 1997
- SÁNCHEZ DE LEÓN J., ANGULO J.M. Control de Procesos Industriales por Computador. Ed. Paraninfo, 1987.
- DE JESÚS, Edmund X., “Manufacturing Data”, BYTE, Diciembre 1995
- IDC Technologies, Data Communications for Instrumentation and Control, IDC 1999.
- STALLINGS, William. Comunicaciones y Redes de Computadores, 5ª ed. Prentice may Iberia. Madrid, 1997.
- TANENBAUM, Andrew; Redes de Computadores; Prentice-Hall 1991.
- ALVAREZ P., Félix. Redes de Comunicaciones. Facultad de Ingeniería Eléctrica Universidad Central de las Villas, Cuba. 1998
- MEDCALF, John. Instrumentación Inteligente para el Control de Procesos. R.E. DE ELECTRÓNICA, Octubre 1993
- FIGWERAS, J. y otros: Informe: Redes Locales Industriales, Regulación y mando, XVIII, 144, Dic. 1984

