

UNIVERSIDAD DE
LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
E.T.S.I. TELECOMUNICACIÓN



TESIS DOCTORAL

Metodología para la integración de sistemas
heterogéneos de comunicaciones de campo en
entornos industriales

Autor: D. Justo Oquelis Cabredo
Director: Dr. D. Aurelio Vega Martínez
Dpto. Electrónica, Telemática y Automática
Diciembre 1997

UNIVERSIDAD DE
LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
E.T.S.I. TELECOMUNICACIÓN



TESIS DOCTORAL

Metodología para la integración de sistemas
heterogéneos de comunicaciones de campo en
entornos industriales

Autor: D. Justo Oquelis Cabredo
Director: Dr. D. Aurelio Vega Martínez
Dpto. Electrónica, Telemática y Automática
Diciembre 1997

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE G. C.
Doctorado en Ingeniería de Telecomunicación

Departamento de Electrónica, Telemática y Automática

Tesis doctoral

**Metodología para la integración de sistemas heterogéneos
de comunicaciones de campo en entornos industriales**

Tesis doctoral presentada por:

D. Justo Oquelis Cabredo

Dirigida por el Doctor:

D. Aurelio Vega Martínez

El Director,

El Doctorando,

Las Palmas de Gran Canaria, Diciembre de 1997.

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE G. C.

Departamento de Electrónica, Telemática y Automática

Tesis doctoral

Metodología para la integración de sistemas heterogéneos de comunicaciones de campo en entornos industriales

Autor:

D. Justo Oquelis Cabredo

Director:

Dr. D. Aurelio Vega Martínez

TRIBUNAL:

Presidente:

Dr. D. Antonio Núñez Ordóñez
Catedrático de Tecnología Electrónica
Universidad de Las Palmas

Vocales:

Dr. D. _____

Dr. D. _____

Dr. D. _____

Dr. D. _____

A mi esposa Milagros y mis cuatro hijos.

Resumen.

El gran desarrollo experimentado por los dispositivos utilizados en la parte más baja de un sistema automatizado – nivel de planta -, y la necesidad de contar con sistemas de producción flexibles, han originado la necesidad de integrarlos, utilizando redes digitales, con los sistemas superiores de control y supervisión.

La capacidad de integración de estos dispositivos es cada vez creciente disponiéndose actualmente de elementos muy simples capaces de gestionar protocolos de acceso a red. Ésto ha originado la aparición de un conjunto de redes que permiten la interconexión de estos elementos con fines de integración, originando la necesidad de definir un sistema de comunicaciones de campo que realmente sea aceptado como estándar por todos los fabricantes. Así el IEC (*International Electrotechnical Commission*) encargó al comité 50 de ISA (*Instrument Society of America*) el estudio de un bus de campo (*fieldbus*) estándar, partiendo de algunos de los que ya existían. La propuesta que realizará ISA, cuando todas las partes involucradas se pongan de acuerdo, tenderá a que dentro de algunos años sólo exista este estándar de comunicaciones de campo, pero mientras se espera el estándar se necesitarán sistemas que solucionen el problema de la integración.

En este trabajo se propone una metodología complementaria de integración, que no pretende competir con los buses de campo, sino ser una alternativa en el caso – muy frecuente por otra parte - en que el tamaño del sistema a integrar no justifique el uso de éstos y los métodos convencionales no alcancen a cubrir las restricciones impuestas por el sistema. También se propone la utilización de un dispositivo llamado Concentrador de Comunicaciones de Campo (CCC), que puede funcionar como elemento individual o formando redes, con la funcionalidad requerida para poder realizar una integración con la metodología propuesta.

Se finaliza con un conjunto de pruebas, realizadas con una red de CCCs diseñada para tal fin, donde se puede verificar la validez de la metodología propuesta.

Agradecimientos.

Este trabajo no es el resultado de un esfuerzo personal sino de una labor de grupo. En este sentido, quiero agradecer sinceramente a todas aquellas personas que han hecho posible de diversas maneras la culminación de la misma.

En primer lugar a mi tutor, Aurelio Vega Martínez quien durante estos años con su experiencia, trabajo y constante apoyo ha sabido guiar este trabajo adecuadamente.

A Antonio Núñez Ordóñez por sus constantes sugerencias y apoyo iniciado incluso mucho tiempo antes del inicio del desarrollo de esta tesis.

Al departamento de Electrónica Telemática y Automática de la ULPGC donde me han recibido como un miembro más del grupo de investigación del CMA y donde encontré más que colegas amigos. Especialmente Roberto, Pedro, Valentín, José, Enrique, Nelson, Tomás y tantos otros que de una forma u otra me han ayudado en este trabajo.

A Juan Cerezo por su amistad y ayuda incondicional, a Baltasar por las muchas horas dedicadas a la realización y mejora de los programas de esta tesis.

Fuera del ámbito de trabajo y estudio, muchos son los amigos que me han ayudado a superar los momentos difíciles. Pepe Sansón y su familia, Carlos Siles y Teresa, Aurelio y Teresa, Virginia Blanco, Felipe Gonzales y su familia, José Luis Barba, José Luis Mota, Javier, Luis, Paco, Eduardo y Marga, Fátima y su familia, María Luisa Gómez por su aliento y apoyo incondicional, y tantos otros.

A mis padres por su constante apoyo y formación que me han dado.

Por último agradezco a mi esposa Milagros y mis cuatro hijos Pili, Ernesto, Gracia y Alvaro su ayuda constante, y comprensión por todo el tiempo que he tenido que robarles para poder llevar adelante este trabajo.

A todos ellos, muchísimas gracias.

Índice.

Resumen.....	i
Agradecimientos.....	iii
Índice.....	v
Índice de figuras.....	ix
Índice de tablas.....	xi
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Planteamiento del problema, necesidad y utilidad de esta investigación.....	1
1.2 Objetivo de la tesis y aportaciones.....	3
1.3 Ordenación de esta memoria.....	4
Capítulo 2. Integración de dispositivos de campo.....	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 División de los sistemas de comunicación en un entorno industrial.....	6
2.3 Normalización y modelos de referencia de las comunicaciones industriales.....	7
2.3.1 Interconexión de los sistemas de comunicación.....	7
2.3.2 Modelo de referencia OSI.....	7
2.3.3 Modelo para comunicaciones de tiempo crítico.....	10
2.4 Integración de dispositivos de campo.....	11
2.4.1 Introducción.....	11
2.4.2 Requisitos para la integración de dispositivos de campo.....	11
2.4.2.1 Conformidad.....	12
2.4.2.2 Interconectividad.....	13
2.4.2.3 Interoperabilidad.....	13
2.4.2.4 Cooperación entre dispositivos de campo.....	14
2.4.2.5 Intercambiabilidad.....	14
2.5 Técnicas de integración actuales.....	15
2.5.1 Conexión de elementos punto a punto.....	16
2.5.2 Conexión de elementos formando redes.....	16
2.6 Limitaciones de las técnicas de integración.....	17
Capítulo 3. Requisitos y prestaciones de los sistemas de comunicación industriales.....	21
3.1 Medios de transmisión.....	21
3.1.1 Par trenzado sin blindaje.....	22
3.1.2 Par trenzado blindado.....	22
3.1.3 Cable coaxial.....	23
3.1.4 Fibra óptica.....	24
3.1.5 Medios inalámbricos.....	24
3.1.6 Conclusiones.....	24
3.2 Estándares de comunicación serie más importantes.....	25
3.2.1 RS-232-C y V24/28.....	25
3.2.2 RS-422 y RS-423.....	26
3.2.3 RS-485.....	26
3.2.4 Bus serie universal USB (<i>Universal Serial Bus</i>).....	27
3.2.5 Conclusiones.....	28
3.3 Topología de redes más usuales.....	29
3.3.1 Topologías más usuales de redes industriales de campo.....	29
3.3.1.1 Estructura de red en anillo.....	29
3.3.1.2 Estructura en estrella.....	30
3.3.1.3 Estructura en árbol.....	31

3.3.1.4	Conclusiones.....	32
3.4	Protocolos de control de acceso al medio.....	32
3.4.1	Protocolos orientados a la conexión.....	32
3.4.2	Sondeo secuencial (<i>Polling</i>).....	33
3.4.3	Multiplexado por división de tiempo (<i>Time Division Multiple Access TDMA</i>).....	34
3.4.4	Protocolos con paso de testigo.....	34
3.4.4.1	Testigo en anillo (<i>Token Ring</i>).....	35
3.4.4.2	Paso de testigo en bus (<i>Token Bus</i>).....	36
3.4.5	Protocolos cuenta atrás binario (<i>Binary Countdown</i>).....	36
3.4.6	Accesos múltiples por detección de portadora (<i>Carrier Sense Multiple Access CSMA</i>):.....	38
3.4.6.1	CSMA/CD (<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i>).....	38
3.4.6.2	CSMA/CA (<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>).....	39
3.4.7	Discusión y conclusiones.....	40
3.5	Modelos de operación de redes de comunicación.....	41
3.5.1	Maestro / esclavo.....	42
3.5.2	Par a par.....	42
3.5.3	Multimaestro.....	43
3.5.4	Cambio de estado de los datos.....	43
3.5.5	Producción cíclica de datos.....	44
3.5.6	Conclusiones.....	44
Capítulo 4.	Redes de área local utilizadas en los entornos industriales.....	45
4.1	Redes de área local de propósito general utilizadas a nivel de planta.....	45
4.1.1	IEEE 802.3 (CSMA/CD).....	46
4.1.2	IEEE 802.4 (<i>Token Bus</i>).....	46
4.1.3	IEEE 802.5 (<i>Token Ring</i>):.....	46
4.1.4	IEEE 802.7 (ANSI FDDI):.....	47
4.1.5	Discusión y conclusiones.....	47
4.2	Redes de área local industriales.....	48
4.2.1	Clasificación según jerarquía CIM.....	48
4.2.1.1	Nivel 1: Redes de dispositivos y de sensores/actuadores.....	49
4.2.1.2	Nivel 2: Buses de campo (<i>fieldbus</i>).....	49
4.2.1.3	Nivel 3: Redes de células de producción.....	49
4.2.1.4	Nivel 4: Redes principales de gestión (<i>backbone</i>).....	50
4.2.2	Consideraciones para una clasificación detallada.....	50
4.2.2.1	Características de las redes de tiempo real.....	50
4.2.2.2	Definición de los modelos de cooperación.....	51
4.2.2.3	Expresión de restricciones de tiempo.....	51
4.2.2.4	Gestión de tiempo explícita en los protocolos.....	52
4.3	Redes utilizadas a nivel de campo.....	53
4.3.1	Introducción.....	53
4.3.2	Definiciones de las distintas redes de campo.....	54
4.3.2.1	Buses de campo.....	54
4.3.2.2	Redes de dispositivos.....	54
4.3.2.3	Redes de sensores y actuadores.....	54
4.3.3	Ventajas de las redes de campo.....	55
4.3.4	Redes de campo más importantes.....	56
4.3.4.1	HART.....	56
4.3.4.1.1	Características principales.....	56
4.3.4.1.2	Protocolo y formato de tramas.....	57
4.3.4.2	PROFIBUS.....	57
4.3.4.2.1	Características principales.....	57
4.3.4.2.2	Protocolo y formatos de tramas.....	58
4.3.4.3	WorldFIP.....	60
4.3.4.3.1	Características principales.....	60
4.3.4.3.2	Protocolo y formato de tramas.....	61
4.3.4.4	P-NET.....	62
4.3.4.4.1	Características principales.....	62
4.3.4.4.2	Protocolo.....	63

4.3.4.5	CAN.....	64
4.3.4.5.1	Características principales.....	64
4.3.4.5.2	Protocolo y formato de tramas.....	66
4.3.4.6	Discusión del análisis de las redes de campo.....	67
4.4	Redes de autómatas programables (PLCs).....	68
4.4.1	Introducción.....	68
4.4.2	DataHighway (DH).....	69
4.4.3	Modbus RT.....	69
4.4.4	Discusión de las redes de autómatas.....	70
4.5	Conclusiones.....	70
Capítulo 5	Metodología propuesta para la integración de los sistemas de comunicaciones de campo.....	71
5.1	Descripción del tipo de problemas que se pretenden solucionar.....	71
5.2	Planteamientos iniciales.....	73
5.3	Metodología propuesta.....	74
5.4	Tipos de elementos y sistemas a integrar.....	75
5.5	Concentrador de comunicaciones de campo CCC.....	77
5.5.1	Requerimientos mínimos del CCC.....	77
5.5.1.1	Requerimientos hardware.....	78
5.5.1.2	Requerimientos software.....	79
5.5.2	Funciones del CCC.....	80
5.6	Topología de una red de CCCs.....	81
5.7	Selección del protocolo entre CCCs.....	82
5.7.1	Análisis de las prestaciones para los CCCs utilizando WorldFIP.....	82
5.7.2	Análisis de las prestaciones para los CCCs de un bus CAN.....	85
5.7.3	Conclusiones para la red de interconexión de CCCs.....	90
5.8	Tipos de transferencias entre nodos.....	91
5.8.1	Mensajes de transferencia sin restricciones.....	93
5.8.2	Mensajes de operación.....	95
5.8.3	Mensajes de difusión del CCCP y mensajes, entre nodos, que presenten restricciones.....	96
5.9	Pasos a seguir para la implantación de la metodología propuesta.....	96
5.9.1	Descripción de los dispositivos a integrar.....	97
5.9.2	Entrada y organización de datos en cada uno de los CCC.....	97
5.9.3	Configuración Remota.....	99
5.9.4	Funcionamiento normal.....	100
5.10	Procesos internos del CCC.....	100
5.10.1	Proceso consola.....	100
5.10.2	Procesos gestores.....	100
5.10.3	Procesos de atención al supervisor.....	101
5.10.4	Procesos de transferencia a bus CCCs.....	102
5.10.5	Drivers de comunicaciones.....	104
5.11	Sistema de comunicación entre los procesos del CCC.....	105
5.12	Cálculo de tiempos de retardo de los mensajes en la red de interconexión de CCCs sobre CAN.....	105
5.12.1	Parámetros característicos.....	105
5.12.2	Aspectos teóricos del tiempo de retardo.....	106
5.12.3	Cálculo del tiempo de retardo en la red de CCCs.....	108
5.12.4	Programa para el cálculo de los tiempos máximos de retardo y verificación del cumplimiento de las restricciones temporales (PCTMR).....	110
5.12.5	Estimación de los tiempos de retardo del software y del controlador.....	111
5.13	Resultados obtenidos.....	113
5.13.1	Tiempos máximos de actualización de la Tabla General de Objetos en una red de CCCs cuando no se incluyen mensajes con restricciones.....	114
5.13.2	Variación del tiempo máximo de actualización de la tabla general de objetos, cuando se incluyen mensajes con restricciones entre nodos.....	115
5.13.3	Tiempos de actualización para 16 nodos con número de mensajes de tabla máximos y mensajes prioritarios variables.....	116
5.13.4	Casos con variables cíclicas.....	118
5.13.4.1	Transferencia de tabla completa y una variable cíclica.....	118
5.13.4.2	Transferencia de tabla completa y dos variables cíclicas.....	119

Capítulo 6. Prototipos de CCCs y pruebas de validación de la metodología propuesta.....	121
6.1 Prototipos de CCCs.....	121
6.1.1 Circuito de acceso al bus.....	122
6.1.1.1 Selección del circuito de interfaz.....	122
6.1.1.2 Descripción del circuito de interfaz.....	123
6.1.1.3 Cálculo de los parámetros del tiempo de un bit.....	126
6.1.2 Gestión de los intercambios en los nodos.....	130
6.1.2.1 Diagrama de flujo del proceso de envío de mensajes de operación y sin restricciones.....	130
6.1.2.2 Proceso de recepción de mensajes de operación y sin restricciones.....	131
6.1.2.3 Proceso de envío de variables cíclicas.....	132
6.1.2.4 Proceso de recepción de variables con restricciones.....	133
6.1.3 CCC basado en bus ISA.....	134
6.1.4 CCC con CPU 68000 de Motorola.....	137
6.2 Pruebas de validación.....	140
6.2.1 Medición de retardo del software y de velocidad máxima de funcionamiento.....	141
6.2.2 Medición del tiempo máximo de retardo en transmisiones de mensajes no prioritarios.....	143
6.2.3 Medición del tiempo máximo de retardo en casos de mensajes prioritarios.....	144
6.2.4 Análisis estadístico del número de bits de relleno.....	145
6.3 Ejemplo de aplicación de la metodología propuesta.....	146
6.3.1 Red de PLCs en una estación depuradora.....	146
6.3.1.1 Descripción de los dispositivos a integrar.....	148
6.3.1.2 Entrada de datos en cada uno de los CCCs.....	148
6.3.1.3 Prestaciones con el método propuesto.....	149
6.3.2 Conclusiones.....	150
Capítulo 7. Conclusiones y líneas de investigación futuras.....	151
7.1 Conclusiones.....	151
7.2 Líneas de investigación futuras.....	154
Glosario de términos.....	155
Referencias.....	157

Índice de figuras.

Figura 1: Modelo de referencia OSI de ISO.....	8
Figura 2: Flujo de datos y relaciones lógicas	9
Figura 3: Modelos para sistemas con tiempos críticos.....	10
Figura 4: Arquitectura funcional de un dispositivo de campo.....	11
Figura 5: Dispositivo de campo conectado a una red.....	15
Figura 6: Ejemplo de sistema a integrar.....	15
Figura 7: Integración convencional punto a punto.....	16
Figura 8: Conexión de elementos formando redes.....	17
Figura 9: Corte de un cable coaxial.	23
Figura 10: Comparación entre los estándares RS-422 y RS-423.....	26
Figura 11: Red RS-485.....	27
Figura 12: Bus serie universal (USB).....	27
Figura 13: Estructura de una red en anillo.....	30
Figura 14: Estructura en estrella.....	30
Figura 15: Estructura en árbol.....	31
Figura 16: Red utilizando protocolo orientado a la conexión.....	32
Figura 17: Sondeo secuencial del maestro a los esclavos.....	33
Figura 18: Intervalos de tiempo asignados en un protocolo TDMA.....	34
Figura 19: Paso de testigo en una red a anillo.....	35
Figura 20: Paso de testigo en una red tipo bus.....	36
Figura 21: Protocolo cuenta atrás binario.....	37
Figura 22: Colisión en una red CSMA/CD.....	38
Figura 23: Progresión de intervalos de acceso en una red CSMA/CA.....	39
Figura 24: Ejemplo de red con mecanismo maestro / esclavo.....	42
Figura 25: Comunicación par a par.....	43
Figura 26: Mecanismo multimaestro con multireparto.....	43
Figura 27: Producción cíclica de datos.....	44
Figura 28: Pirámide CIM de automatización.....	48
Figura 29: Señales HART.....	56
Figura 30: Estructura de un mensaje HART.....	57
Figura 31: Arquitectura de los protocolos PROFIBUS.....	59
Figura 32: Control de acceso a la red PROFIBUS.....	59
Figura 33: Formato de tramas en PROFIBUS.....	60
Figura 34: Distribución de ancho de banda en WorldFIP.....	61
Figura 35: Arquitectura del protocolo WorldFIP.....	62
Figura 36: Formato de tramas en WorldFIP.....	62
Figura 37: Paso de testigo virtual en una red P-NET.....	64
Figura 38: Posibles variantes de interfaces con CAN.....	65
Figura 39: Niveles de CAN estandarizados.....	66
Figura 40: Tramas para identificador estándar y extendido.....	67
Figura 41: Ejemplo de sistema a integrar.....	72
Figura 42: Integración de elementos con interfaces de comunicación propias.....	72
Figura 43: Red de integración con CCCs.....	75
Figura 44: Nodo CCC del sistema propuesto.....	78
Figura 45: Ejemplo de red de CCCs.....	81
Figura 46: Secuencia de tramas en WorldFIP.....	83

Figura 47: Bytes agregados en las capas OSI de WorldFIP	83
Figura 48: División del campo de datos en SDS para mensajes fragmentados.	91
Figura 49: División del campo de identificador en DeviceNet.....	91
Figura 50: Estructura de la tabla de objetos de un CCC.	93
Figura 51: Estructura en memoria de la tabla de variables.....	98
Figura 52: Formato de un objeto de comunicación de un CCC.....	98
Figura 53: Procesos de atención al supervisor.	101
Figura 54: Procesos de transferencia a bus CCCs.	102
Figura 55: Ejemplo de secuencia de envío de variables con restricción de tiempo.	104
Figura 56: Esquema simplificado de funcionamiento del área de memoria compartida.	105
Figura 57: Puesta en cola de un mensaje periódico.	108
Figura 58: Ejemplo de fichero de entrada de datos.....	110
Figura 59: Ejemplo de fichero obtenido con el PCTMR.....	111
Figura 60: Esquema utilizado en la medición del TRS.....	112
Figura 61: Bits de trama antes de interrupción.....	113
Figura 62: Tiempos máximos de respuesta.	115
Figura 63: Tiempos máximos de respuesta.	116
Figura 64: Tiempos máximos de respuesta.	117
Figura 65: Comparación de tiempos para longitudes de los datos de los mensajes con restricciones de 1 y 2 bytes respectivamente (a 125 kb/s).....	118
Figura 66: Restricción cíclica de tiempo para una variable.....	118
Figura 67: Tiempo máximo de respuesta con una variable con restricción.....	119
Figura 68: Restricción cíclica de tiempo para dos variables.	119
Figura 69: Tiempo máximo de respuesta con dos variables con restricción.	120
Figura 70: Estructura y partes principales de un objeto CAN.	124
Figura 71: Envío de objetos en una interfaz para bus CAN 82527.....	125
Figura 72: Diagrama de bloques del circuito de interfaz.	125
Figura 73: Mapa de direcciones del circuito de interfaz.	127
Figura 74: División del tiempo de un bit.	127
Figura 75: Registros de configuración de tiempos de un bit.	128
Figura 76: Diagrama de flujo de envío de mensajes de operación y sin restricciones.	131
Figura 77: Diagrama de flujo del proceso de recepción de datos de operación y sin restricciones.	132
Figura 78: Diagrama de flujo de envío de variables cíclicas.....	133
Figura 79: Diagrama de flujo de la recepción de variables con restricciones.....	134
Figura 80: CCC con bus ISA	135
Figura 81: Diagrama a bloques del sistema con arquitectura PC.	135
Figura 82: Foto de la interfaz CAN para bus ISA.	136
Figura 83: Montaje de interfaz y CPU monotarjeta en chasis industrial.....	136
Figura 84: Diagrama de bloques del sistema con CPU 68000.	138
Figura 85: Foto de la tarjeta de interfaz a bus CAN para CPU 68000.....	138
Figura 86: Foto de la CPU 68000.....	139
Figura 87: Foto del sistema completo CPU / tarjeta de interfaz CAN.....	139
Figura 88: Comparación entre los dos CCCs.....	140
Figura 89: Red de pruebas utilizada.	141
Figura 90: Oscilogramas del tiempo de retardo de la interfaz.....	142
Figura 91: Oscilogramas del tiempo de retardo del software.....	142
Figura 92: Comparación gráfica de los tiempos máximos de respuestas teóricos y medidos.....	144
Figura 93: Comparación gráfica de los tiempos máximos de retardo teóricos y medidos.	145
Figura 94: Red de autómatas en la estación depuradora de Barranco Seco.....	147
Figura 95: Red de integración propuesta.	148

Índice de tablas.

Tabla 1: Categorías de cables UTP.....	22
Tabla 2: Cables coaxiales típicos.....	23
Tabla 3: Comparación de los medios de transmisión más usuales.....	24
Tabla 4: Comparación de los estándares serie más utilizados.....	28
Tabla 5: Principales características de las estructuras de redes.....	31
Tabla 6: Comparación de los protocolos de control de acceso.....	40
Tabla 7: Modelos de cooperación entre APs.....	51
Tabla 8: Características principales de HART.....	57
Tabla 9: Características principales de PROFIBUS.....	58
Tabla 10: Características principales de WorldFIP.....	61
Tabla 11: Características principales de P-NET.....	63
Tabla 12: Características principales de CAN.....	66
Tabla 13: Características de los campos de una trama CAN.....	67
Tabla 14: Ejemplo de redes de autómatas.....	68
Tabla 15: Características principales de la red DH.....	69
Tabla 16: Características principales de la red Modbus RT.....	70
Tabla 17: Requerimientos de memoria mínimos recomendados para un CCC.....	78
Tabla 18: Puertos de comunicación en el CCC.....	79
Tabla 19: Tiempo TR en una red WorldFIP.....	83
Tabla 20: Eficiencia y ancho de banda utilizado en WorldFIP ($TR=10 TMAC$).....	84
Tabla 21: Eficiencia y ancho de banda utilizado en WorldFIP ($TR=70 TMAC$).....	84
Tabla 22: Estructura de una trama de datos estándar en CAN.....	85
Tabla 23: Estructura de una trama de datos extendida en CAN.....	85
Tabla 24: Eficiencia de CAN para transmitir mensajes de datos.....	87
Tabla 25: Estructura de una trama remota con identificador estándar.....	87
Tabla 26: Estructura de una trama remota con identificador extendido.....	88
Tabla 27: Eficiencia de CAN para transmitir mensajes de petición remota.....	88
Tabla 28: Tiempo de envío de mensajes CAN (en ms) a 125 kb/s.....	89
Tabla 29: Tiempo de envío de mensajes CAN (en μ s) a 500 kb/s.....	89
Tabla 30: Tiempo de envío de mensajes CAN (en μ s) a 1 Mb/s.....	89
Tabla 31: División de los bits del identificador.....	92
Tabla 32: Cantidad de variables sin restricciones integradas por cada nodo.....	94
Tabla 33: División del identificador para el caso de formato extendido.....	94
Tabla 34: Cantidad de variables sin restricciones integradas por cada nodo con identificador extendido.....	94
Tabla 35: Mensajes de operación de un CCC.....	95
Tabla 36: Pasos a seguir.....	96
Tabla 37: Tabla de dispositivos por zonas.....	97
Tabla 38: Tabla de variables locales a introducir en un nodo CCC.....	97
Tabla 39: Tiempo empleado para transmitir un mensaje entre CCCs.....	107
Tabla 40: Tiempos libres para los CCCs entre tramas.....	113
Tabla 41: Número total de mensajes.....	114
Tabla 42: Tiempos máximos de respuesta en ms.....	114
Tabla 43: Número total de mensajes.....	115
Tabla 44: Tiempos máximos de respuesta en ms.....	116
Tabla 45: Tiempos máximos de actualización.....	117
Tabla 46: Tiempos de respuesta (ms) para tabla más un mensaje con restricción.....	119

Tabla 47: Tiempos de respuesta (ms) para tabla más dos mensajes con restricción.	120
Tabla 48: Dispositivos de interfaz a bus CAN más utilizados.	122
Tabla 49: Tarjetas de interfaz a bus CAN para PC.	124
Tabla 50: Tipos de interconexión del 82517.	126
Tabla 51: Parámetros de los tiempos de un bit.	129
Tabla 52: Parámetros de los tiempos de un bit.	129
Tabla 53: Modos de funcionamiento del 8255.	137
Tabla 54: Tiempos de acceso para transmisión.	142
Tabla 55: Tiempos de acceso para recepción.	143
Tabla 56: Tiempos máximos de respuesta en ms.	143
Tabla 57: Tiempos máximos de respuesta en ms.	144
Tabla 58: Número de combinaciones considerando sólo los identificadores (mensaje sin ningún byte de datos).	146
Tabla 59: Combinaciones posibles considerando los bytes de datos.	146
Tabla 60: Número medio de bits de relleno.	146
Tabla 61: Zonas a integrar.	148
Tabla 62: Descripción de los dispositivos a integrar.	149
Tabla 63: Entrada de datos en CCC de zona 5.	149
Tabla 64: Objetos a intercambiar con el CCCP.	150

Capítulo 1.

Introducción.

1.1 Planteamiento del problema, necesidad y utilidad de esta investigación.

En la mayoría de plantas industriales - como por ejemplo: químicas, de distribución eléctrica, textiles, etc. - existen sistemas de control que permiten ejecutar los procesos necesarios en las líneas de producción.

Hasta hace pocos años estos sistemas eran realizados mediante lazos de control locales, que han ido evolucionando, desde primitivos sistemas neumáticos, hasta complejos sistemas de control electrónicos que la tecnología ofrece hoy en día. Normalmente estos sistemas de control forman "islas", dentro de todo el entorno productivo, que muchas veces es necesario integrar con otras partes del mismo. Algunas de las razones por las que este tipo de sistemas necesita estar integrado con otras áreas, son por ejemplo: gestión global de los recursos, planificación total del sistema productivo, mejoras en el control de los procesos, competencia, etc.

La diversidad de estas "islas", en cuanto a fabricantes y sistemas de comunicación que soportan, hace que sea necesario encontrar una solución de integración, pues nos encontramos dispositivos de planta que utilizan sistemas de comunicación propietarios, otros tienen sistemas abiertos, e incluso otros disponen de sistemas de comunicación cuya fabricación ha sido discontinuada o su mantenimiento es sumamente costoso.

La empresa *Fisher-Rosemount*, uno de los más grandes fabricantes de dispositivos de control, diseñó el primer sistema de comunicación a nivel de planta llamado HART (*Highway Addressable Remote Transducer*) que hizo coexistir a los lazos convencionales de control en

corriente junto con una señal digital que permite la integración de algunos parámetros del sistema de control. A esta iniciativa siguieron los estándares nacionales PROFIBUS y FIP, alemán y francés respectivamente, que definen un bus de comunicaciones industriales según especificaciones de grupos de usuarios y de fabricantes de dispositivos utilizados en la automatización de fábricas. Adicionalmente surgieron otros estándares, originando la necesidad de definir un sistema de comunicaciones de campo que realmente sea aceptado como estándar por todos los fabricantes. Así el IEC (*International Electrotechnical Commission*) encargó al comité 50 de ISA (*Instrument Society of America*) el estudio de un bus de campo (*fieldbus*) estándar, partiendo de algunos de los que ya existían.

La propuesta que realizará ISA, cuando todas las partes involucradas se pongan de acuerdo, tenderá a que dentro de algunos años sólo exista este estándar de comunicaciones de campo.

Aparte del tiempo que tendrá que transcurrir antes de tener el estándar disponible, y de que éste esté completamente implantado, los sistemas de comunicación en el nivel más bajo de los entornos automatizados se continuarán realizando con sistemas propietarios, haciendo necesaria la existencia de sistemas que permitan la integración de las "islas" que se forman dentro de todo el entorno controlado.

Las soluciones de integración, en el nivel más bajo de los sistemas de comunicación industriales, contemplan en su mayoría los puntos siguientes:

1. Uso de drivers de comunicación, con el elemento particular a integrar, implantado dentro de un hardware determinado, normalmente un PC.
2. Exportación de las variables, del elemento integrado, a las otras aplicaciones o a un sistema de integración y supervisión (normalmente un sistema SCADA – *Supervision Control and Data Acquisition* -), mediante mecanismos de comunicación determinados (en el caso de la mayoría de los SCADA este mecanismo es el DDE – *Dynamic Data Exchange* -).

Los sistemas de integración, como los descritos anteriormente, solucionan gran parte de los problemas reales que se encuentran en la industria. Pero cuando se necesitan integrar varios elementos con algunos requisitos particulares, por ejemplo variables que deben cumplir restricciones de tiempo o mantener consistencia temporal, este tipo de solución ya no es factible.

En el caso de sistemas con restricciones, como las antes mencionadas, se puede recurrir a un bus de campo (*fieldbus*), pero su implantación sólo será posible si los elementos de campo son capaces de aceptar este conjunto de protocolos. En los casos en que sea posible la utilización de un bus de campo, es necesario también evaluar la relación precio / prestaciones, pues existen situaciones donde el volumen de datos a integrar no justifica el uso de este tipo de bus.

En la presente tesis se propone una metodología complementaria de integración, que no pretende en absoluto competir con los buses de campo, sino ser una alternativa en el caso en que el tamaño del sistema a integrar no justifique el uso de éstos y los métodos convencionales no alcancen a cubrir las restricciones impuestas por el sistema. Estas situaciones son muy comunes en las plantas industriales y justifican esta investigación.

También en esta tesis se propone la utilización de un dispositivo llamado Concentrador de Comunicaciones de Campo (CCC), que puede funcionar como elemento individual o formando redes, con la funcionalidad requerida para poder realizar una integración con la metodología propuesta. Este dispositivo tiene una gran capacidad de puertos de comunicación y permite, cuando forma redes, esencialmente dos tipos de transferencia: la de todos los datos de los elementos integrados a un nodo CCC principal (CCCP), y la transferencia de mensajes con restricciones de tiempo.

Para facilitar la integración, las redes de CCCs permiten la configuración remota desde el CCCP, que se encarga del envío de la información de todo el sistema a los sistemas superiores de comunicación. De esta manera, los únicos que se necesitan configurar son los nodos locales. Otra de las funciones del CCCP es la de verificar que se cumplen todas las restricciones de tiempo del sistema. Para ésto, dispone de un proceso que permite calcular los tiempos máximos de respuesta del último dato que se actualice.

El CCC propuesto también permite definir algunas variables con restricciones especiales, por ejemplo asegurar la consistencia temporal, o definirles restricciones temporales.

1.2 Objetivo de la tesis y aportaciones.

El objetivo de esta tesis es proponer una metodología de integración sistemática, para los casos en que el volumen de datos, o el tamaño del sistema no justifiquen el uso de un bus de campo, o las restricciones del sistema a integrar no permitan el uso de alguna metodología convencional.

Hay una gran cantidad de sistemas automatizados cuya integración en los sistemas superiores de comunicación plantea un verdadero problema en el momento de decidir qué metodología seguir. Teóricamente estos problemas estarán resueltos cuando se defina el estándar para comunicaciones de campo, pero aún así por algunos años se continuará con el problema de integrar aquellos sistemas que fueron realizados sin considerar un estándar - la mayoría de sistemas actualmente en funcionamiento - que requieran ser integrados con los niveles superiores de gestión global o supervisión.

Con esta metodología se pretende que la integración se realice de manera simple, flexible y sobre todo sistemática, en otras palabras que el integrador solamente defina localmente las variables que se desea integrar, incluyendo las restricciones si es que las hay y que el CCCP sea el encargado de verificar y planificar todas las variables existentes en el sistema.

La metodología propuesta para la integración de sistemas de comunicación de campo facilitará mucho la integración de este tipo de sistemas por las siguientes razones:

- **Facilidad de implantación:** gracias a las características de autoconfiguración, del CCCP, los integradores sólo deberán configurar las variables localmente en cada uno de los nodos, o bien realizar configuración total desde el CCCP que transferirá las configuraciones locales a cada CCC.

- Facilidad de verificación: la verificación de las restricciones impuestas se realizará de manera automática por el CCCP y si hay alguna que no las cumple se pasará información al nodo correspondiente.
- Facilidad de modificación: tanto en quitar o poner nuevos nodos, incluso bajo tensión, o en modificar variables de los nodos. Pues cada vez que en un nodo se realice un cambio se notificará automáticamente al CCCP, el cual procederá a reconfigurar las variables que se ven afectadas en el sistema.

1.3 Ordenación de esta memoria.

La presente memoria está dividida en 4 grandes bloques.

El primero de ellos está formado por el Capítulo 2, donde se da una visión general de la integración de dispositivos de campo.

El segundo bloque está formado por el Capítulo 3 “Requisitos y prestaciones de los sistemas de comunicación industrial a nivel de campo”, y el Capítulo 4, “Redes de área local utilizadas en entornos industriales”. Estos dos capítulos son el resultado de la investigación bibliográfica realizada en el presente trabajo, permitiéndonos establecer las características y funcionalidad de un sistema de integración en el nivel de los sistemas de comunicación abordados en esta tesis.

El tercer bloque, compuesto por el Capítulo 5, “Metodología para la integración de sistemas de comunicación de campo”, es donde se realizan las principales aportaciones de la tesis. Están basadas en proponer una metodología alternativa para la integración mencionada, simple, flexible, de bajo coste y sistemática para todos aquellos sistemas donde la solución *fieldbus* no está justificada y/o las soluciones convencionales no ofrecen la funcionalidad requerida. La metodología propone el uso de un dispositivo, llamado Concentrador de Comunicaciones de Campo (CCC), que permite obtener la funcionalidad requerida.

El cuarto bloque está compuesto por el Capítulo 6, “Prototipos de CCCs y pruebas de validación de la metodología propuesta”, y el Capítulo 7 “Conclusiones y líneas abiertas de investigación”. En el primero se realiza la verificación de los resultados obtenidos en el Capítulo 5, y se demuestra la funcionalidad de la metodología propuesta, y en el último se presentan las conclusiones y las líneas de investigación, que como resultado del presente trabajo se propone continuar dentro del Laboratorio de Equipos y Productos Industriales del Centro de Microelectrónica Aplicada de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) y del Laboratorio de Electrónica y Sistemas Automáticos de Control de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de La Laguna (UDEP).

El documento se complementa con los anexos correspondientes al “Glosario de términos”, y al de “Bibliografía” respectivamente.

Capítulo 2.

Integración de dispositivos de campo.

2.1 Introducción.

A diferencia de hace pocos años, los dispositivos de campo, elementos últimos dentro de un proceso controlado, cuentan con una capacidad creciente de inteligencia y procesamiento local, debido al gran desarrollo experimentado por la electrónica.

La capacidad de comunicación que también incorporan permite integrarlos dentro del entorno automatizado para poder monitorizarlos y controlarlos. El objetivo es mejorar la eficiencia del sistema productivo haciéndolo más fiable y rentable.

Lógicamente esta integración obliga a manejar una gran cantidad de datos existentes a lo largo del proceso automatizado; datos que deben ser actualizados y transferidos a otras zonas del entorno para su posterior utilización. La mayoría de estos datos procederán del nivel de planta (nivel más bajo dentro del entorno), que generalmente requerirán ser integrados con los niveles superiores de los sistemas de comunicación, necesitando en muchas aplicaciones cumplir restricciones de tiempo críticas.

Los sistemas de comunicación con **tiempos críticos** aparecen en muchos lugares; por ejemplo en los sistemas de frenado de los coches, sistemas de control de alerones en aviones, control de turbinas en plantas de generación, procesos de refinado, etc.

El término **tiempo crítico** [PhBr91] [ISA359E] [ISA360C] es utilizado para representar la existencia de un intervalo de tiempo, dentro del cual una o más acciones específicas deben ser completadas con un nivel de certeza definido. El fallo en la finalización de la acción especificada, dentro del intervalo de tiempo, conlleva el riesgo del fallo de la aplicación que requiere la acción, con el consiguiente riesgo para los equipos y planta e incluso para las personas.

Las soluciones de integración convencionales son limitadas en muchos aspectos siendo su implantación poco flexible y costosa. En el presente capítulo se estudian las soluciones convencionales en uso, y se caracterizan sus prestaciones y sus limitaciones.

2.2 División de los sistemas de comunicación en un entorno industrial.

Dentro de un entorno industrial, o en una unidad (célula) de producción automatizada, existen varios niveles para el tratamiento de los datos, y lógicamente en cada nivel las exigencias para el sistema de comunicaciones son distintas; por ejemplo al nivel de gestión (niveles más altos del sistema automatizado) la cantidad de datos tratados a través de las redes informáticas es enorme – del orden de magnitud de los megabytes -. A este nivel no existen restricciones críticas de tiempo. Los tiempos de respuesta se sitúan en el orden de los minutos, o incluso horas (por ejemplo en las copias de seguridad – *backup* - diarias, etc.).

A medida que bajamos dentro del entorno automatizado, nos encontramos que al nivel de planta los requerimientos son diferentes. Así por ejemplo, en el ámbito de célula de producción se gestiona una cantidad de mensajes de longitud importante, que sirven para recoger los datos de producción y sincronizar los diferentes aparatos presentes, con tiempos de respuesta del orden de algunos milisegundos. Más abajo encontramos que las transferencias son de pocos bytes, con restricciones de tiempo muchas veces de pocas decenas de microsegundos.

Tomando como base lo antes expuesto podemos dividir los sistemas de comunicación, en un entorno automatizado, en dos grandes grupos:

1. Un primer grupo relacionado con los sistemas de comunicación, que tienen que cumplir restricciones de tiempo. Este grupo contiene todas las redes industriales que pueden realizar transferencias de datos en tiempos garantizados. Generalmente este requerimiento lo presentan los elementos últimos de una cadena de automatización como pueden ser actuadores, sensores, lazos de control local, autómatas, etc.; y también algunos intercambios entre células de producción. Este nivel tiene como característica principal que las comunicaciones se realizan con tramas cortas que varían de algunos bits a algunos cientos de bytes.
2. El segundo grupo está relacionado con los sistemas que intercambian grandes paquetes de información, utilizando en la mayoría de los casos estándares como por ejemplo ETHERNET con TCP/IP, pero sin restricciones de tiempo en las transferencias.

Si bien este segundo grupo está completamente definido en todos los niveles OSI con que cuenta, no sucede lo mismo con los sistemas del primer grupo, existiendo un gran número de estándares impuestos por los distintos fabricantes. La interconexión de estos dos grandes grupos permite obtener la gestión integrada de todo el proceso productivo.

2.3 Normalización y modelos de referencia de las comunicaciones industriales.

2.3.1 Interconexión de los sistemas de comunicación.

Desde el auge de los microprocesadores la electrónica y la informática han contribuido, de manera determinante, a que los sistemas de control sean cada vez más sofisticados y complejos. Esto ha originado que se multiplique notoriamente la cantidad de conexiones y la cantidad de información a intercambiar en este tipo de sistemas.

Uno de los primeros pasos que se dieron para lograr la interconexión fueron las redes tipo estrella, en donde un gran número de usuarios está conectado a una unidad central mediante una conexión punto a punto.

La tecnología permitió luego la migración hacia sistemas de comunicación con topología tipo árbol donde la gran diferencia es que los usuarios están conectados a un cable común multiplexándose en el tiempo la información que tienen que transmitir.

La evolución de las técnicas de transmisión ha permitido el desarrollo de nuevos protocolos de comunicación reduciendo el tiempo y mejorando la fiabilidad de las comunicaciones. Mejorar la fiabilidad y el tiempo de transmisión ha hecho posible que actualmente se cuente con sistemas de interconexión de elementos a nivel de campo donde existen restricciones de tiempo críticas que antes no podían ser cumplidas.

2.3.2 Modelo de referencia OSI.

Al estudiar las comunicaciones industriales se analiza primero el modelo de referencia OSI [OSI83] (*Open System Interconnection*) de ISO (*International Standard Organisation*) para estudiar luego las peculiaridades de su utilización dentro del entorno de las comunicaciones de campo.

Hay que tener en cuenta que este modelo describe la infraestructura de las comunicaciones requeridas por diversidad de aplicaciones, como por ejemplo bancos, reservas de aerolíneas, o distribución comercial donde se requiere acceso distribuido a grandes bases de datos. En este tipo de sistemas se enfatiza mucho la exactitud de la información y la flexibilidad de las comunicaciones. El retardo de las respuestas solamente se considera como una base estadística.

El modelo de referencia OSI se basa en una estructura de siete niveles o capas tal como se muestra en la Figura 1.

Este modelo ha sido concebido con el fin de identificar y separar de forma genérica los distintos grupos funcionales de un sistema de comunicación determinado. Por lo tanto las funciones del modelo sirven únicamente de referencia y comparación. No es por consiguiente

una norma concreta a la cuál un sistema de comunicación se debe adherir. Este modelo subdivide las funciones de un sistema de comunicación en siete capas o niveles, pero no es indispensable disponer de todos estos niveles en cada sistema; pues de acuerdo a la funcionalidad requerida algunas capas intermedias a menudo se omiten.

Seguidamente presentamos una breve descripción de cada nivel de OSI:

- Nivel 1 (capa física - *physical layer* -): este nivel define las características físicas de la parte de comunicación de un circuito. Particularmente en este nivel están especificados los niveles eléctricos, las corrientes, los conectores, el sistema de codificación eléctrica u óptica de los bits en el tiempo, etc. El cable de conexión no está comprendido dentro de esta especificación, dado que el modelo OSI se aplica únicamente a las características de comunicación de un nodo de la red, y no a la red misma, pero sí está especificado el medio físico de transmisión.

Capa 7:	Capa de aplicación
Capa 6:	Capa de presentación
Capa 5:	Capa de sesión
Capa 4:	Capa de transporte
Capa 3:	Capa de red
Capa 2:	Capa de enlace
Capa 1:	Capa física

Figura 1: Modelo de referencia OSI de ISO.

- Nivel 2 (capa de enlace de datos - *data link layer* -): define el formato de las tramas y su codificación lógica, así como los mecanismos de protección por ejemplo el CRC y su verificación, la inserción automática de bits para evitar la transmisión de secuencias demasiado largas sin variación del nivel eléctrico por ejemplo - *bit stuffing* -, etc.
- Nivel 3 (capa de Red - *network layer* -): en este nivel se describen las características topológicas de la red, con la finalidad de garantizar que las tramas de información sean encaminadas de acuerdo con el recorrido elegido, desde la fuente al consumidor. Este nivel es indispensable en los casos en que más de un recorrido estuviese activo y a disposición simultáneamente.
- Nivel 4 (capa de transporte - *transport layer* -): este nivel define el modo de proceder a la conexión y a la desconexión de dos o más usuarios, así como el modo de establecer un canal de comunicación entre éstos a través de la red.
- Nivel 5 (capa de sesión - *session layer* -): una vez establecido el canal lógico de comunicación entre dos puntos, éstos pueden comenzar a sincronizar sus aplicaciones, y abrir una sesión de trabajo. Estas operaciones se determinan a este nivel.
- Nivel 6 (capa de presentación - *presentation layer* -): cuando los dos sistemas en comunicación utilizan diversas formas de presentación de los datos, por ejemplo el código

ASCII o un código extendido a 16 bit, es a este nivel donde se realiza la conversión debida y se seleccionan las correspondencias oportunas.

- Nivel 7 (capa de aplicación - *application layer* -): el último nivel está relacionado con la descripción de la interfaz hacia los programas de aplicación, por ejemplo transferencia de ficheros, directorios de ficheros, etc. Todavía a este nivel no se tiene la aplicación, dado que esta no forma parte del sistema de comunicación. Este nivel incluye:
 - Métodos estándares de iniciar y terminar las comunicaciones [ISO8650].
 - Medios estándares fiables para proporcionar transacciones remotas [ISO9072-2].
 - Un conjunto común de funciones, de soporte de comunicaciones, para programas de usuarios locales.
 - Lenguajes estándares apropiados para las diferentes necesidades de las aplicaciones específicas, junto con sus reglas de codificación a nivel de bits, por medio de los cuales los programas de usuarios cooperantes puedan comunicar clases específicas de información [ISO9596].

Los niveles OSI 1 y 2 proporcionan el transporte de datos básico para una red simple. Los niveles 3 y 4 extienden estas funciones para una red compleja compuesta de muchas redes simples con diferentes propiedades. Los niveles 5 y 6 proporcionan un marco de trabajo para establecer y negociar las comunicaciones orientadas por el usuario y finalmente el nivel 7 proporciona los medios de decodificar estas comunicaciones.

En el emisor de un sistema tipo OSI cada capa, desde que la información se genera por la aplicación hasta que llega al medio físico, agrega información a los datos del usuario; esta información sólo puede ser interpretada por el nivel similar del sistema receptor. Realizada la transmisión a través de la red, en el receptor cada nivel del modelo OSI se encarga de desempaquetar la información agregada al momento del envío por el transmisor, procediendo en sentido inverso. Cada nivel a la recepción se ocupa de desempaquetar lo que fue agregado a los datos originales al momento de la transmisión en el nivel correspondiente. Por consiguiente existe un flujo vertical de datos físicos, mientras se mantiene una correspondencia lógica horizontal entre los niveles OSI de los dos nodos que se están comunicando. La Figura 2 muestra el flujo de datos y la correspondencia lógica de los niveles OSI.

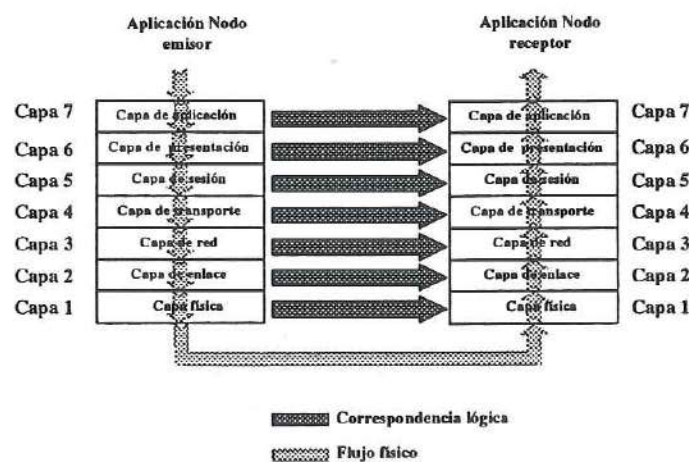


Figura 2: Flujo de datos y relaciones lógicas

2.3.3 Modelo para comunicaciones de tiempo crítico.

Muy pocos estándares han nacido para cumplir los requerimientos de las aplicaciones industriales, bajo el modelo de referencia OSI, donde el tiempo límite para enviar algunos mensajes es un parámetro fundamental.

Entre estos estándares nacidos para tratar de cubrir las aplicaciones industriales con tiempos restringidos son de citar dos de mucha influencia:

- El estándar *Token Bus* (ISO/IEC 8802/4) [IEEE TP85].
- La especificación de mensajes de fabricación (MMS - *Manufacturing Message Specification*) [ISO9506-1], [ISO9506-2].

Durante los años 1988 y 1989 el grupo de usuarios europeos de MAP (*Manufacturing Automation Protocol*) [MAP3.0] examinó las deficiencias del elenco de los protocolos OSI para cumplir restricciones de tiempo, e identificó 10 requerimientos [EMUG89] juzgados como necesarios para comandar y controlar una red. Estos requerimientos deberían servir como lista de comprobación durante el desarrollo de los nuevos estándares.

Afortunadamente los requerimientos con tiempos críticos, en los sistemas industriales automatizados, generalmente están relacionados con un proceso físico, y por lo tanto están geográficamente localizados donde este proceso se desarrolla. Se han hecho muchos estudios con el fin de proporcionar un modelo para las comunicaciones con tiempos críticos [ArRa91][PhBr91][TCCA92], dando como resultado la arquitectura para sistemas de comunicación con tiempo crítico mostrada en la Figura 3.

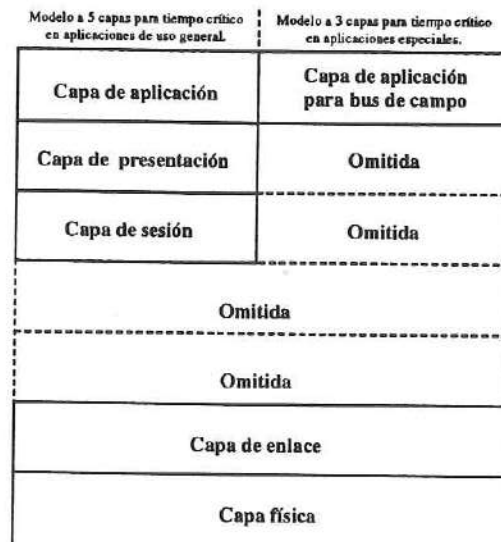


Figura 3: Modelos para sistemas con tiempos críticos.

Podemos citar a PROFIBUS y FIP, dos de los buses de campo más utilizados, como ejemplo de sistemas que emplean este tipo de modelo, específicamente el de 3 capas.

2.4 Integración de dispositivos de campo.

2.4.1 Introducción.

Actualmente la mayoría de las aplicaciones industriales implican el uso de una gran cantidad de elementos de campo como sensores y actuadores. Dado los requerimientos actuales de la integración, dentro de un entorno totalmente automatizado, estos elementos de campo no solo deben ser capaces de realizar complicadas funciones si no que también deben ser capaces de comunicarse y trabajar en conjunto con otros equipos, de acuerdo a las necesidades finales del usuario. Los equipos por tanto, en primer lugar deben tener la **conformidad** de un estándar de comunicación. Estos dispositivos tienen que satisfacer inicialmente las pruebas de conformidad del sistema de comunicación que utilizan, pero muchas veces esto no es un requisito suficiente para poder trabajar en conjunto, ya que entre aplicaciones que tengan la conformidad de un estándar puede que sea imposible la colaboración entre las mismas. Para hacer posible la colaboración entre dispositivos de campo, éstos deben también ofrecer otra propiedad llamada **interoperabilidad** o cooperación entre dispositivos.

2.4.2 Requisitos para la integración de dispositivos de campo.

Es necesario en primer lugar poder distinguir claramente los siguientes conceptos: conformidad, interconectividad, interoperabilidad, cooperación e intercambiabilidad.

Un dispositivo de campo consta de una arquitectura de cuatro partes funcionales [SieTho94], tal como se muestra en la Figura 4. Las partes 1 y 2 representan todos los aspectos de los intercambios con la red (o buses de campo). La parte 1 representa en particular una pila de comunicaciones en el significado del modelo a capas de OSI, mientras la parte 2 está relacionada con la gestión de las mismas. Las partes 3 y 4 cubren el total de la aplicación por medio de los Procesos de Aplicación (AP – *Application Process*). Estos acceden a los servicios de la última capa del modelo OSI. En el caso clásico de un ordenador, un proceso de aplicación es por ejemplo un programa, como el MMS [ISO9506-1] [ISO9506-2], el cual utiliza directamente los servicios de la capa de aplicación.

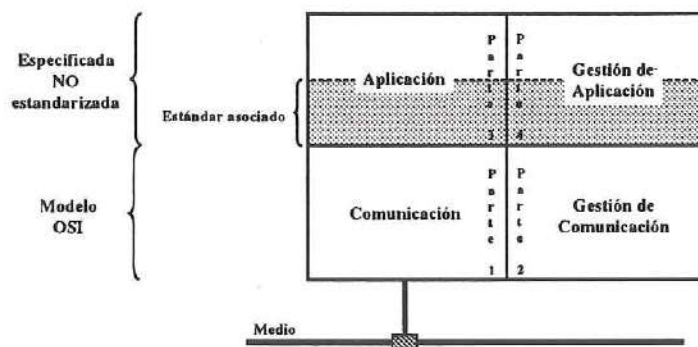


Figura 4: Arquitectura funcional de un dispositivo de campo.

Los Procesos de Aplicación y sus administradores especificados como partes 3 y 4, están normalmente especificados pero no estandarizados. Pero para hacer posible que los dispositivos de campo interoperen correctamente, es necesario definir funciones generales que puedan ser estandarizadas - los llamados estándares asociados (*companion standard*) o bloques funcionales -. Estos están representados en el área sombreada de la Figura 4.

El estándar asociado proporciona un modelo estandarizado de dispositivo (para sensores, actuadores, PLCs, robots y comandos numéricos) y particulariza los servicios y objetos de la capa de aplicación. La capa de aplicación puede hacer presentaciones uniformes y completas de estos servicios y objetos, a pesar de las variadas estructuras de elementos. Cada estándar asociado direcciona un elemento en particular o una clase de aplicación.

Existen dos modelos principales de estándar asociado para buses de campo. El primer modelo definido por ISA (*Instrument Society of America*) está orientado al servicio y utiliza bloques funcionales. El segundo modelo está orientado al flujo de datos. Éste está especificado en la guía de implementación de estándar asociado para FIP. Un estándar asociado debe contener una descripción del dispositivo, (un modelo de dispositivo con los objetos visibles y funciones y la acción sobre las funciones y objetos), una definición de las entidades del modelo (definición de los objetos, funciones y acciones) y la proyección de cada objeto sobre la capa de aplicación con la definición de los Protocolos de Unidad de Datos (*PDU Protocol Data Unit*) asociados.

Un estándar asociado, o bloque funcional, permite la simplificación del problema de cooperación. Se reducen así las partes específicas. En cualquier caso, los APs específicos deben escribirse teniendo en consideración sus especificaciones. La cooperación puede mejorarse realmente por la definición del estándar asociado si todas las funciones de las partes 3 y 4 pueden integrarse dentro de él. Su misión no sólo es cubrir la sintaxis sino también la semántica de los intercambios PDU. Esta es la misión de los estándares asociados de MMS o los bloques funcionales ISA/IEC, los cuales enriquecen los servicios de la capa de aplicación.

2.4.2.1 Conformidad.

La conformidad está relacionada con las partes estandarizadas (1 y 2 de la Figura 4). En la época en que las redes eran privadas, un fabricante definía su protocolo de comunicación para todos sus equipos, y eventualmente para todos los equipos compatibles con él. Hoy en día, con el auge del concepto de sistema abierto y específicamente para dispositivos de campo, teniendo en cuenta el gran número de fabricantes, los servicios y protocolos deben ser estandarizados. ISO define el concepto de prueba de conformidad [ISO87] y también la manera de realizarla. La prueba de conformidad es una operación que permite decir si una implementación particular de un protocolo o un grupo de protocolos se ajusta a lo expresado en el estándar. Sin embargo si N equipos son declarados conformes existe la posibilidad de que no puedan cooperar en la misma aplicación.

Las razones para la no cooperación entre dispositivos que tienen la conformidad son simples. Primeramente el estándar presenta opciones, algunas veces ambiguas, y selecciones diferentes pueden hacer que dos productos tengan la conformidad sin ser compatibles entre ellos. En segundo lugar las pruebas nunca son exhaustivas. En tercer lugar las consideraciones de

tiempo y recursos no son tomadas en cuenta en las pruebas de conformidad. Estas razones originan la necesidad de introducir la noción de interoperabilidad.

2.4.2.2 Interconectividad.

Antes de definir la interoperabilidad, es necesario presentar otra definición, muy utilizada y muchas veces confundida con ésta: la interconectividad. La interconectividad está proporcionada por las capas que definen el protocolo de comunicación. Si un dispositivo determinado cumple con el protocolo de una red, éste puede ser conectado sin causar problemas en la misma. En este caso los dispositivos son interconectables, pero cada uno de estos dispositivos que soportan el mismo protocolo (en término de número de capas definidas por el mismo), puede tener su propia definición de los servicios o elementos de información que ofrece.

Los dispositivos que presentan esta propiedad, a parte de poder interconectarse e intercambiar datos, no podrán tener conocimiento de que es lo que estos datos representan.

2.4.2.3 Interoperabilidad.

La interoperabilidad de dispositivos que tienen la conformidad con un mismo estándar, es una propiedad que expresa la capacidad de éstos para comunicarse, cooperar, y participar de un objetivo común. Las razones por las cuales muchas veces los dispositivos no son interoperables, pueden resumirse en las siguientes:

1. Imprecisión de límites.
2. Especificaciones estándares ambiguas o equivocadas.
3. Implementaciones con prestaciones temporales diferentes.
4. Pruebas de conformidad no exhaustivas.

La prueba de interoperabilidad es vista como un complemento a la prueba de conformidad; y su primera aproximación se puede realizar reuniendo equipos reales que habían pasado las pruebas de conformidad en la misma plataforma y probar si tales equipos son capaces de comunicarse correctamente y por consiguiente si ellos pueden interoperar. Esta es una operación costosa y difícil, en vista de lo heterogéneo de los dispositivos, el número de equipos y la falta de pruebas de conformidad para las partes 3 y 4. Esta metodología permite solamente verificar aquellos productos que podrían trabajar juntos bajo un cierto número de hipótesis seleccionadas. Si el usuario final toma otro producto con otras configuraciones, está claro que la prueba anterior no puede garantizar la interoperabilidad en todos los casos. La interoperabilidad de las comunicaciones sin embargo no está definida de una manera estándar.

Han surgido algunas confusiones acerca de la interoperabilidad del hecho de que esta propiedad se obtiene parcialmente de una prueba global imponiendo que las 4 partes incluyan necesariamente algunos APs. Se puede entonces introducir el concepto de cooperación entre dispositivos para distinguirlo de la interoperabilidad. La interoperabilidad está reservada a las capas de comunicación y a los perfiles de todas las partes estandarizadas (independientemente de los APs). La interoperabilidad está de este modo relacionada con las

partes 1 y 2 si no existen los estándares asociados. De esta manera podemos distinguir la interoperabilidad de la cooperación entre dispositivos, la cuál está relacionada solamente con las partes 3 y 4 de la Figura 4.

2.4.2.4 Cooperación entre dispositivos de campo.

Podemos definir la cooperación, entre dispositivos de campo, como la propiedad que tienen los APs de cada uno de los elementos que cooperan, para poder interactuar y satisfacer un objetivo determinado. Indudablemente esto presupone la interoperabilidad y por lo tanto la conformidad con un estándar común a todos estos dispositivos.

Podemos decir que los dispositivos cooperan cuando:

- Los servidores APs interpretan correctamente los servicios requeridos realizados desde un cliente APs,
- los clientes APs interpretan correctamente los servicios de respuesta realizados por los servidores,
- los consumidores interpretan los intercambios de datos realizados por los productores.

Se dice que la interpretación de la información es correcta sí se reconoce bien la sintaxis, se entiende la semántica, y se respetan las características de tiempo.

Hoy en día aún no existe una prueba de conformidad para las partes 3 y 4, de tal manera que esta situación puede llevar a casos de no-cooperación [Ben92], similares a los problemas de interoperabilidad expuestos anteriormente. Como ejemplo de elementos que no pueden cooperar, se puede citar el de dos o más dispositivos - por ejemplo uno que mide la presión y otro que la utiliza -, que tienen definidas unidades de medición diversas. En este caso la cooperación sólo es posible si uno de ellos es capaz de adaptarse a las características del otro con una operación de parametrización.

2.4.2.5 Intercambiabilidad.

La intercambiabilidad puede definirse como la propiedad que presenta un dispositivo de ser reemplazado por otro (funcionalmente similar pero de fabricante diverso), sin tener que modificar el sistema. Cada equipo debe obviamente ser interoperable con los otros equipos del sistema global. Los APs de cada uno deben presentar la propiedad de cooperación con los otros sistemas de APs.

Por ejemplo si todas las características de los equipos A y B son similares, entonces, A y B son intercambiables. En el caso en que las características de A estén incluidas en las características de B, entonces A puede ser sustituido por B; pero B solamente es intercambiabile con A si las características de este último son las utilizadas en la interoperabilidad del sistema y en las relaciones de cooperación.

La Figura 5 muestra gráficamente los niveles en los cuales se presentan algunas de las características antes mencionadas, en un dispositivo conectado a una red industrial.

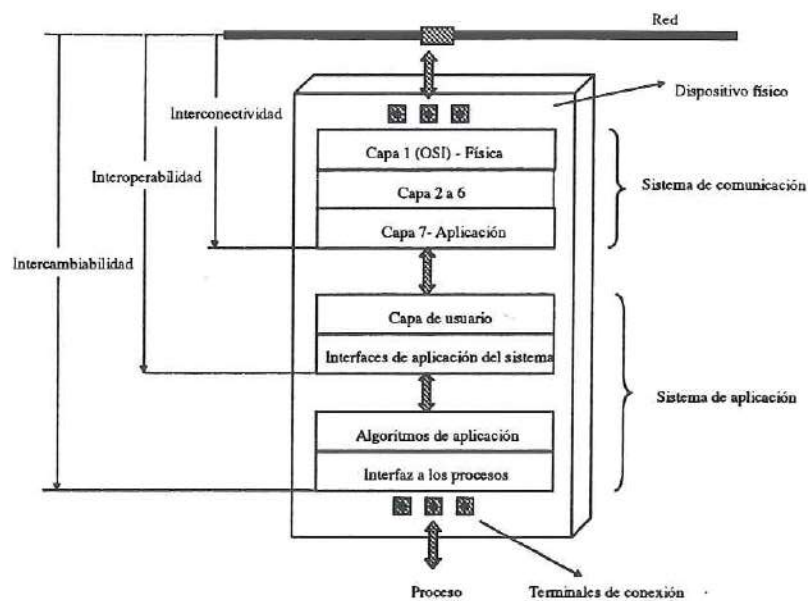


Figura 5: Dispositivo de campo conectado a una red.

2.5 Técnicas de integración actuales.

En este apartado se describen las técnicas de integración usualmente empleadas a nivel de campo, dentro de un entorno automatizado como por ejemplo el mostrado en la Figura 6.

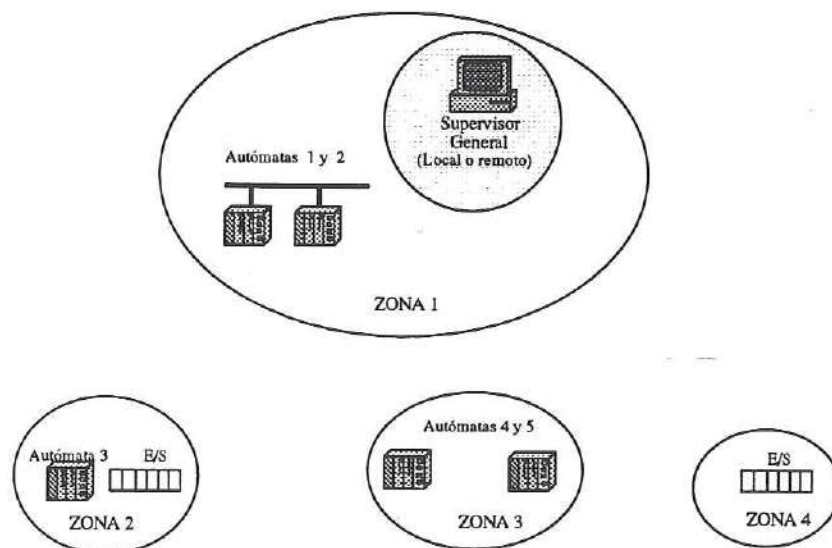


Figura 6: Ejemplo de sistema a integrar.

2.5.1 Conexión de elementos punto a punto.

Cuando se requiere integrar elementos cuyas interfaces de conexión, por ejemplo puertos de programación, les permiten conectarse directamente con el sistema integrador, como los mostrados en la zona 3 de la Figura 6, se procede normalmente a una solución de integración punto a punto tal como se muestra en la Figura 7.

En este caso el sistema integrador es un PC con el SCADA oportuno. El PC tiene que tener dos puertos de comunicación iguales a cada uno de los estándares que tengan los autómatas respectivamente. De manera similar el PC debe ejecutar ambos protocolos y el sistema de supervisión. Hay que tener en cuenta que algunos autómatas tienen disponibles puertos especiales, aparte del puerto de programación, para intercambio de datos con un sistema externo.

Si se requiere el intercambio de datos entre los autómatas, éste debe ser realizado por el software de supervisión.

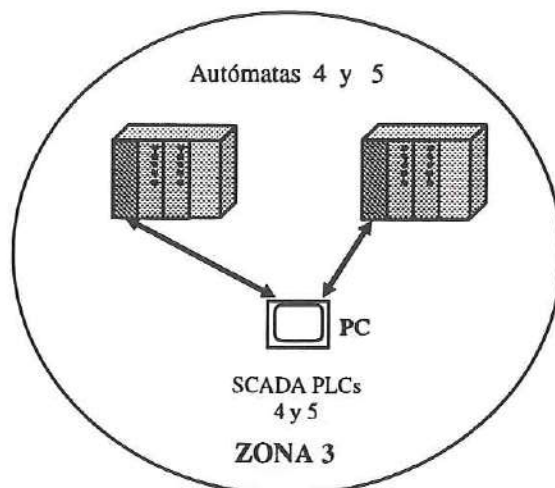


Figura 7: Integración convencional punto a punto.

2.5.2 Conexión de elementos formando redes.

Cuando se requiere integrar los elementos formando redes, por ejemplo los mostrados en la zona 1, tenemos tres posibilidades de interconexión.

1. **Conexión al maestro de la red:** Este caso es similar al expuesto en 2.5.1, el sistema de integración verá solamente al autómata maestro de la red como nodo único. Se podrán ver las variables exportadas de los autómatas esclavos.
2. **Conexión como maestro de la red:** En este caso el sistema supervisor debe hacer el papel de maestro de la red. Los cambios a realizar en la programación de todo el sistema pueden ser notables. El protocolo a implantar en el maestro debe ser el de la red.

3. **Conexión como un nodo esclavo de la red:** Esta solución es poco empleada pues al comportarse el sistema integrador, como un nodo esclavo sólo tendrá acceso al sistema cuando el maestro se lo permita.

Estos tres casos están representados en la Figura 8. Al igual que antes normalmente el sistema de integración lo constituyen un PC y los *drivers* respectivos.

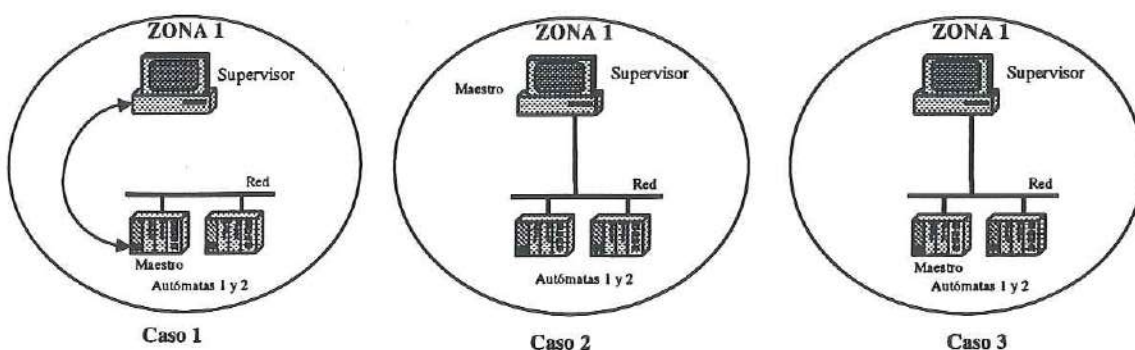


Figura 8: Conexión de elementos formando redes

Hemos proporcionado una breve descripción de los métodos más usuales de integración de los sistemas de comunicación a nivel de campo. Estos casos son los más simples que podemos encontrar, lógicamente todo el sistema se complica cuando se necesita integrar dos o más zonas.

2.6 Limitaciones de las técnicas de integración.

La existencia de dispositivos de control de marcas diferentes, dentro de una planta industrial, origina que éstos formen grupos aislados de dispositivos que utilizan el mismo protocolo de comunicación, pero a los cuales les es imposible acceder o proporcionar datos, directamente, a otros elementos que no son de la misma familia o que no soportan el mismo protocolo. Bajo este esquema de funcionamiento se ha propuesto una serie de soluciones para permitir la integración de equipos de campo de familias diversas.

La integración con otras zonas, dentro del mismo nivel con protocolos distintos, también implica el uso de hardware. En la mayoría de las veces se ofrece como solución el uso de un autómata o un PC, que se encarga de la gestión de las comunicaciones con las otras zonas a integrar.

La integración de los sistemas de comunicación, en un entorno industrial automatizado, está limitada en muchos aspectos y se complica cuando se quiere supervisar, o incluso gestionar, sistemas que tengan gran cantidad de elementos de campo con distintos protocolos de comunicación. Las soluciones de integración total, en estos casos, no siempre son tan flexibles y versátiles como se desea. A continuación se resumen las principales limitaciones encontradas cuando se pretenden integrar las comunicaciones en un sistema, como el mostrado en la Figura 6, que cuenta con distintos protocolos a nivel de planta:

1. Dificultad para el intercambio de información con restricciones de tiempo entre los equipos de distintos fabricantes.

Con las soluciones de integración antes mencionadas, la posibilidad de intercambiar datos que tengan que cumplir algunos requerimientos de tiempo es una tarea difícil. Para lograr ésto se podría recurrir a un sistema de bus de campo si es que la cantidad de datos implicados lo justifica. El volumen de datos que justifican el uso de un bus costoso normalmente no se da en las fábricas de pequeña y mediana envergadura.

2. Limitación de las prestaciones del sistema SCADA de supervisión y control.

Cuando la integración se realiza desde la máquina que gestiona el sistema SCADA, y se cuenta con varios protocolos para comunicarse con los elementos integrados, ocurre que la máquina que gestiona el SCADA también tiene que gestionar todos los *drivers*, de los elementos de campo respectivos, haciendo que el software de atención a los mismos disminuya las prestaciones del sistema de supervisión y control. Ésto no es un problema si el PC utilizado es suficientemente potente.

3. Dificultad para permitir la supervisión y control remoto.

La supervisión remota de un sistema integrado con la metodología convencional, implica que el supervisor cuente con todo el software de gestión de pantallas SCADA, del sistema remoto supervisado, más los programas de control que se desean monitorizar. Esto es una dificultad, pues muchas veces sólo se requiere visualizar las pantallas pero sin mantener copia local del programa remoto. Todo se complica aún más cuando se hacen cambios en el sistema supervisado y el supervisor remoto no los ha actualizado.

4. Dificultad de cálculo de los tiempos de actualización.

Con los sistemas convencionales es muy difícil estimar los tiempos de actualización de todas las variables del sistema, ya que los protocolos normalmente no lo permiten.

5. Limitaciones para cubrir distancias considerables.

Cuando el sistema a integrar tiene dos zonas que se encuentran geográficamente a unos cuantos cientos de metros, los sistemas convencionales ya no pueden solucionar el problema directamente. Esto sucede porque las interfaces para los dispositivos se realizan normalmente con el estándar del dispositivo integrado (RS-232, RS-422, etc.).

6. Dificultad para configuración remota.

Cuando el sistema integrado tiene más de dos zonas diversas, la configuración remota del sistema de integración no es tan simple. Este tipo de soluciones normalmente no ofrece la posibilidad de autoconfiguración ni cambios de la misma en situación normal de trabajo.

7. Cambios en el número de elementos del sistema.

Los sistemas convencionales normalmente no permiten el crecimiento de los elementos supervisados sin tener que parar todo el sistema y revisar las configuraciones en todos los elementos bajo integración. Más aún, las posibilidades de conexión y desconexión de elementos bajo tensión es muy limitada o inexistente.

Estas son algunas de las principales limitaciones de los sistemas de integración de comunicaciones de campo convencionales actualmente en uso. La necesidad de superarlas ha sido una importante motivación para la presente investigación. Las soluciones aportadas en los capítulos 5 y 6 constituyen una contribución metodológica y de ingeniería a la integración de los sistemas de comunicaciones de campo.

Capítulo 3.

Requisitos y prestaciones de los sistemas de comunicaciones industriales a nivel de campo.

En el presente capítulo se hace un análisis y una evaluación de prestaciones de los principales elementos que están relacionados con los sistemas de comunicaciones industriales a nivel de campo. Para facilitar el análisis, éste se realiza en cuatro partes:

1. Medios de transmisión.
2. Principales estándares de comunicación.
3. Protocolos de acceso al medio.
4. Topología y modelos de operación de redes.

La evaluación se efectúa considerando las condiciones físicas del entorno y las características de los datos que se transfieren a este nivel. El sistema que se propone en la presente tesis está basado en las conclusiones del presente análisis y del específico de redes industriales realizado en el capítulo 4.

3.1 Medios de transmisión.

Los medios de transmisión son los elementos que permiten que la información llegue, con la menor cantidad de ruido y distorsión, a todos los dispositivos – también llamados nodos o estaciones - involucrados en el proceso de comunicación. A nivel de campo además deben permitir incrementar el número de nodos de manera simple, y una manipulación física sencilla.

Los medios más utilizados se pueden dividir en tres tipos: los que utilizan cobre, los que utilizan fibra óptica y los medios inalámbricos. En las redes de campo, de los medios de transmisión que utilizan cobre, normalmente se utilizan tres tipos: los pares trenzados sin blindaje (UTP *Unshielded Twisted Pair*), los pares trenzados blindados (STP *Shielded Twisted Pair*) y el cable coaxial.

A continuación se presenta una descripción, y análisis comparativo, de los principales medios de transmisión utilizados en el entorno de las redes de campo.

3.1.1 Par trenzado sin blindaje.

Este es uno de los medios de transmisión más utilizado. Como su nombre lo indica está constituido por dos conductores arrollados uno sobre otro. El trenzado tiene como finalidad el que un campo de interferencia electromagnética, induzca en cada uno de ellos voltajes iguales. De esta manera el voltaje diferencial inducido de uno respecto a otro, no respecto a tierra, se cancela. Para lograr ésto se debe tener en cuenta el número de vueltas por centímetro, y la uniformidad y simetría del trenzado.

Este tipo de medio está normalizado de acuerdo al estándar para cables EIA TSB 36, en 5 categorías donde la superior es la que soporta las velocidades más altas. En la Tabla 1 se muestran algunas características de las tres principales categorías de este tipo de medio según la norma antes indicada (se excluyen las categorías 1 y 2 por no estar recomendadas para transmisión de datos).

Categoría	Prestaciones	Aplicaciones
Categoría 3	Cables UTP con transmisiones de hasta 16 Mhz	Token ring 4 Mb/s Ethernet a 10 Mb/s
Categoría 4	Cables UTP con transmisiones de hasta 20 Mhz	Token ring 16 Mb/s Ethernet a 10 Mb/s
Categoría 5	Cables UTP con transmisiones de hasta 100 Mhz	ATM sobre cobre Ethernet a 100 Mb/s

Tabla 1: Categorías de cables UTP

Estos cables presentan una impedancia característica de 100 ohm, y tiene una tasa de error típico de 10^{-5} .

3.1.2 Par trenzado blindado.

Este es quizás el tipo de cable más utilizado en el sector industrial. Se presenta como los anteriores pero cubierto con un blindaje metálico exterior que puede ser de dos tipos: laminado o trenzado.

El blindaje exterior se utiliza para reducir las interferencias electromagnéticas (EMI *Electromagnetic Interference*) causadas por fuentes como motores eléctricos, líneas de distribución eléctrica, señales de radio, etc.

Teóricamente con este tipo de medio se reducen los niveles de ruido; sin embargo, la pantalla ofrece una gran capacidad respecto a tierra y se comporta como una antena, convirtiendo el ruido recibido en corriente que fluye en el blindaje cuando ésta ha sido conectada a tierra. Esta corriente debe inducir una corriente simétrica en los conductores cancelando el ruido que se podría presentar en el receptor. Sin embargo, cualquier discontinuidad en el blindaje, o cualquier fallo en la conexión a tierra, produce ruido en el receptor disminuyendo sus prestaciones. Con este tipo de cables correctamente blindados se puede alcanzar velocidades de hasta 300Mb/s.

3.1.3 Cable coaxial.

Este tipo de cable está constituido por dos conductores concéntricos, separados por un aislante uniforme (tanto en dimensiones físicas como en consistencia dieléctrica), y envainados en una envoltura aislante. Este tipo de cable, ha sido durante muchos años el más utilizado para grandes anchos de banda. La razón de ésto radica en que su impedancia característica está muy controlada (en gran parte debido a su construcción). Hay dos tipos de cable coaxial, uno utilizado para transmisiones digitales (cable coaxial de banda base) y otro empleado para transmisiones analógicas (cable coaxial de banda ancha).

Este tipo de medio es mucho más costoso que el par trenzado. Además los de grandes diámetros son difíciles de manipular e instalar. Su impedancia característica depende del tipo de cable y varía entre 50 y 91 ohm. La Tabla 2 muestra los tipos de cable coaxial más usuales.

Tipo	Impedancia	Aplicaciones
RG9/U	75 ohm	Banda ancha
RG58/U	50 ohm	Ethernet 10 Mb/s
RG59/U	75 ohm	TV por cable
RG62/U	91 ohm	ARCnet

Tabla 2: Cables coaxiales típicos.

El cable de banda base normalmente se utiliza a velocidades de datos de 10 Mb/s y tiene una tasa de error típica de 10^{-7} ; mientras que el utilizado para banda ancha tiene velocidades superiores a los 150 Mb/s (suma de muchos canales) y tasas de error de 10^{-8} . La Figura 9 muestra un corte de un cable de este tipo.

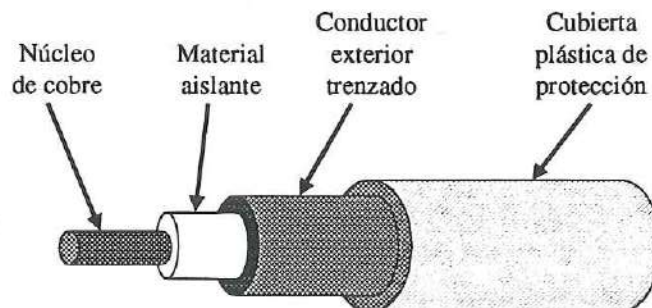


Figura 9: Corte de un cable coaxial.

3.1.4 Fibra óptica.

El principio de funcionamiento de este tipo de medio es muy simple pues se basa en transmitir una señal utilizando luz. Dado que la luz no se ve afectada por las interferencias existentes en el ambiente este medio es ideal para los entornos industriales. El problema es que es una solución costosa y difícil de implantar y mantener.

Las velocidades que se pueden alcanzar son de hasta 1000Mb/s con tasas de error extremadamente bajas. El número de elementos que pueden ser conectados a un bus de fibra óptica es pequeño y por consiguiente la topología en anillo, que utiliza enlaces de fibra óptica entre puntos de acceso, es la más conveniente. Alternativamente utilizando acopladores en estrella se pueden conectar hasta 64 elementos.

3.1.5 Medios inalámbricos.

Al hablar acerca de los medios de comunicación inalámbricos hacemos referencia a la atmósfera, como medio donde la energía se propaga. Los medios inalámbricos más utilizados son los que hacen uso de las radio-comunicaciones, con modulación de amplitud o frecuencia.

Se han realizado algunos trabajos sobre implementaciones de este tipo de medio en sistemas de comunicaciones de campo, con soporte para transmisiones con tiempos críticos, como por ejemplo el proyecto OLCCHA [OLCHFA] como extensión del bus de campo FIP; entre otros [MoMu95][GeLe94]. Este tipo de sistemas puede ser fácilmente perturbado por el ruido existente en este tipo de entornos. Otras fuentes de error pueden ser originadas por las señales de radio y televisión comerciales. Su implantación se limita sólo a las aplicaciones que por el tipo de acceso o por presentar partes en continuo movimiento, hacen rentable este tipo de solución.

A continuación presentamos en la Tabla 3 una comparación de los medios de transmisión, más utilizados dentro del entorno industrial.

	Velocidad aceptada	Tasas de error	Coste
Par trenzado	3 Mb/s	10^{-5}	Bajo
Coaxial de banda base	10 Mb/s	10^{-7}	Medio
Coaxial de banda ancha	150 Mb/s	10^{-8}	Alto
Fibra óptica	1000 Mb/s	10^{-10}	Muy alto

Tabla 3: Comparación de los medios de transmisión más usuales.

3.1.6 Conclusiones.

La selección del medio de transmisión, a utilizar en las comunicaciones de campo, depende de:

1. Las distancias y accesibilidad de los dispositivos: Normalmente a nivel de campo, dentro de las células de producción y entre ellas, se utiliza cable trenzado, ya que permite cubrir sin dificultad las distancias promedio de este tipo de entorno.
2. El coste del medio a utilizar: Si las distancias son considerables, como en planta, lo mejor es utilizar un medio de transmisión poco costoso - el más utilizado es el cable trenzado blindado -.
3. La flexibilidad que presente la inserción de nuevos nodos: Nuevamente en este caso el que más se adecua es el cable trenzado blindado por sus excelentes características de manipulación.
4. La facilidad para llevar los conductores de alimentación a los nodos remotos: La mayoría de dispositivos inteligentes de campo necesitan fuentes de alimentación externa, en corriente continua. Por lo tanto el medio también debe considerar este requerimiento.
5. En las aplicaciones donde existan zonas que por el acceso, o por tener partes en movimiento, resulta costosa la implantación de algún medio físico cableado, es conveniente analizar la rentabilidad de utilizar conexiones inalámbricas a estos puntos específicos.

3.2 Estándares de comunicación serie más importantes.

Dentro del nivel, de los sistemas de comunicación industriales, donde se enmarca esta tesis, los estándares de comunicación utilizados son los tipo serie, por las ventajas que este tipo de transmisión presenta. Dependiendo de si la aplicación es punto a punto, o de múltiples nodos se hace uso de los estándares mono o multimaestro. A continuación presentamos una descripción y comparación de los estándares de este tipo más utilizados.

3.2.1 RS-232-C y V24/28.

Este estándar fue publicado por la Asociación de Industrias Electrónicas (EIA *Electronics Industries Association*) en 1969 [EIA69] y hasta los inicios de los años 80 ha sido el único estándar para interfaces serie para conectar ordenadores o terminales a sistemas de comunicación vía módem, y para conectar terminales directamente a ordenadores.

La versión europea CCITT del estándar, equivalente a la RS-232-C, es el V24 para las características mecánicas, y el V28 para las características eléctricas. Se utiliza para conectar dos elementos hasta una distancia máxima de 15 metros.

3.2.2 RS-422 y RS-423.

Para superar las limitaciones, en cuanto a velocidad y distancia, del RS-232-C se propusieron nuevos estándares al inicio de los años 70. Los estándares publicados fueron el: EIA RS-422 [EIA75] que define las características de los circuitos de interfaces digitales de voltaje balanceado y el EIA RS-423 [EIA75] que define las características de los circuitos de interfaces digitales de voltaje no balanceado. La Figura 10 muestra una comparación entre estos dos tipos de estándar.

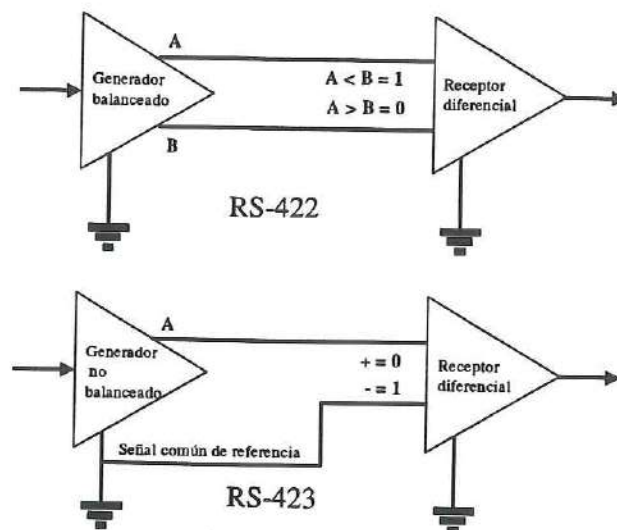


Figura 10: Comparación entre los estándares RS-422 y RS-423.

RS-422: Define un sistema balanceado a tierra. Esto significa que los dos dispositivos que se comunican, transmisor y receptor, tienen la misma resistencia a tierra. Esto mejora sus características frente a las posibles capacidades no balanceadas presentes en las líneas no balanceadas. La velocidad de funcionamiento varía entre 20 kb/s a 10 Mb/s. Está especificada para un transmisor y hasta 10 receptores.

RS-423: En este caso las señales no están balanceadas respecto a tierra. Este estándar permite sólo transferencias hasta un máximo de 20 kb/s. Está especificada para un transmisor y hasta 10 receptores.

3.2.3 RS-485

Este estándar [Axel95] supera con creces las limitaciones del RS-232-C, pues permite comunicar hasta 32 unidades maestras/esclavas en un mismo enlace. Un enlace puede tener hasta 1200 metros. Estas características, además de la velocidad que puede alcanzar (10Mb/s a corta distancia), hacen que sea ideal para enlaces de dispositivos en entornos industriales. La Figura 11 muestra un ejemplo de implementación de este tipo de estándar realizado con el transceiver MAX481.

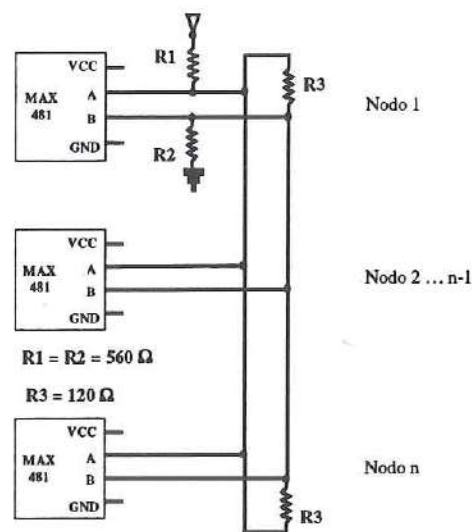


Figura 11: Red RS-485.

3.2.4 Bus serie universal USB (*Universal Serial Bus*).

Recientemente (la versión 1.0 es del 15 de Enero de 1996) INTEL junto con Microsoft, NEC, IBM, etc., han presentado una nueva especificación de bus, el USB [USB96], como bus único para conectar todos los periféricos de un PC a la unidad central.

Aunque este bus ha empezado a estar disponible hace poco tiempo, presenta características muy buenas, en cuanto a gestión de mensajes de tiempo crítico, que podrían hacer que dentro de poco pueda ser exportado a los entornos industriales. La Figura 12 muestra esquemáticamente este tipo de bus.

En la Tabla 4 se presenta una comparación de los cuatro estándares actualmente más utilizados para comunicaciones serie en el nivel de campo.

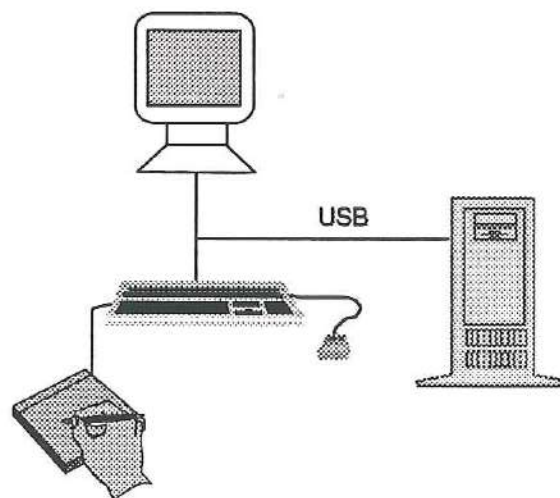


Figura 12: Bus serie universal (USB).

Especificación	RS-232	RS-423	RS-422	RS-485
Modo de transmisión	No balanceado	No balanceado	Balanceado	Balanceado
Longitud máx. de cable	15 m	1200 m	1200 m	1200 m
Velocidad máx. de transmisión	20 kb/s	20 kb/s	10 Mb/s	10 Mb/s
Salida mínima del driver	± 5 V	± 3.6 V	± 2 V	± 1.5 V
Salida máxima del driver	± 15 V	± 6 V	± 5 V	± 6 V
Sensibilidad del receptor	± 3 V	± 0.2 V	± 0.2 V	± 0.2 V
Número máximo de maestros	1	1	1	32
Número máximo de receptores	1	10	10	32
Carga del driver (Ohm)	3 a 7 k Ω	450 Ω mín.	100 Ω mín.	60 Ω mín.

Tabla 4: Comparación de los estándares serie más utilizados.

3.2.5 Conclusiones.

Considerando que los dispositivos utilizados en los entornos automatizados, PLCs, sensores, actuadores, etc., implementan estándares de comunicación que dependen de los fabricantes, y no de los requerimientos de los sistemas de integración, podemos constatar los siguientes hechos:

1. Dentro de los entornos industriales se encuentran normalmente gran parte de los estándares antes mencionados, pues la mayoría de fabricantes, por ejemplo de autómatas, incorporan un puerto serie (con algún estándar de los enumerados anteriormente), para programación e intercambio de datos con el dispositivo. El más utilizado, especialmente por los autómatas, es el estándar RS-232.
2. Como la mayoría de *drivers*, para dispositivos de campo, están desarrollados para intercambiar los datos por el puerto de programación, ocurre que la distancia máxima del cable de comunicación, entre éstos y el sistema de integración, está limitada por las especificaciones del estándar que se utilice en dicho puerto (15 metros para RS-232). Si se supera esta distancia se deben utilizar elementos que permitan ampliarla, por ejemplo convertidores de RS-232 a RS-485.
3. Cuando se necesita interconectar dos o más dispositivos de campo, cubriendo distancias de hasta 1200 metros, el estándar más utilizado es el RS-485 por sus buenas características de inmunidad al ruido, número de nodos que acepta, capacidad multimaestro y porque el medio de transmisión que utiliza - un par de cables de cobre trenzados - es de bajo coste. Este estándar es el que más se adapta a los requerimientos de los sistemas de integración de dispositivos de campo.
4. Respecto al futuro de los estándares de comunicación a nivel industrial, puede inferirse que el USB tiene buenas posibilidades de ser ampliamente utilizado. Aunque este estándar no ha sido diseñado específicamente para el tipo de entornos industriales, podría ser exportado a ellos, en un futuro cercano, dadas las características de gestión de mensajes con tiempos críticos que especifica, y porque los costos de estas interfaces se espera sean muy bajos, debido a los volúmenes de producción estimados.

5. Los estándares paralelos normalmente no son utilizados en los sistemas de comunicación de campo, debido a las distancias que es necesario cubrir. La mayoría de estos estándares han nacido para servir como buses de instrumentación y son muy empleados en los sistemas de interconexión de instrumentos de laboratorio, donde las distancias de interconexión no superan los 20 m. El más importante es el desarrollado por Hewlett-Packard conocido como GPIB (*General Purpose Instrument Bus*) que está estandarizado según la norma IEEE-488.

3.3 Topología de redes más usuales.

El intercambio de datos, cuando queremos comunicar sólo dos nodos, se realiza con una conexión punto a punto, por ejemplo utilizando un protocolo propietario que emplea los niveles más bajos de algún sistema estándar como el clásico RS-232, que sólo define el nivel 1 del modelo OSI. En este caso la topología del sistema de comunicación es lineal – de un nodo al otro -. En este tipo de sistemas la única limitación la impone la distancia soportada por el estándar.

Pero en la mayoría de sistemas, de comunicación industriales, existen más de dos elementos; es por tanto necesario conectarlos siguiendo alguna disposición espacial de los mismos respecto al medio que los une. En otras palabras es necesario conectar de acuerdo a una topología determinada todos los elementos de la red. Existen diversos modelos típicos de topología. En el presente apartado describimos la estructura de las más usuales. En la sección 3.5 describimos los modelos de operación de redes utilizadas en el nivel de planta de los sistemas industriales.

3.3.1 Topologías más usuales de redes industriales de campo.

Dentro de los sistemas de comunicación de campo las topologías más utilizadas son las siguientes:

3.3.1.1 Estructura de red en anillo.

En este tipo de estructura se conectan de manera sucesiva todos los nodos de la red hasta volver, formando un anillo, al nodo inicial. Entre un nodo y el siguiente la comunicación es unidireccional. El nodo sucesivo se encarga de repetir la señal recibida, extrayendo al mismo tiempo las partes que le corresponden y colocando, en el momento apropiado, la información que debe enviar. Gráficamente en la Figura 13 se representa este tipo de estructura.

La mayor ventaja con que cuenta este tipo de estructura es que las señales son regeneradas en cada nodo. Por consiguiente cada nodo desarrolla el papel de repetidor de la señal, permitiendo que la red pueda cubrir distancias considerables sin necesidad de hardware adicional.

Una de las desventajas que presenta este tipo de red es la imposibilidad de añadir nuevos nodos sin tener que interrumpir todo el sistema, ya que es necesario abrir el anillo para la inserción del nuevo elemento. También si un nodo deja de funcionar toda la red se vuelve inoperativa, siendo ésta la causa de que casi no se utilice en los sistemas de comunicación de planta.

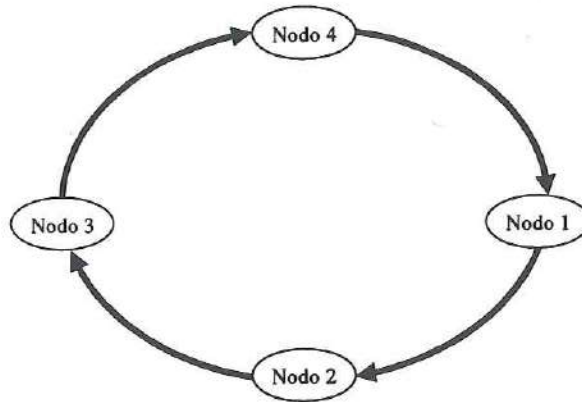


Figura 13: Estructura de una red en anillo.

3.3.1.2 Estructura en estrella.

Este tipo de estructura presenta características completamente diversas de la estructura en anillo, pues está basada en un punto central donde se sitúa un nodo que desarrolla funciones especiales, por ejemplo de maestro o servidor de la red, al cual se conectan todos los demás nodos de la red. En este tipo de conexión es posible añadir elementos al sistema sólo si el maestro tiene disponibles conexiones libres. Si un nodo queda fuera de servicio la red sigue funcionando, a no ser que sea el nodo central el del fallo.

La desventaja principal que presenta es que se necesita una gran cantidad de cable para unir a todos los dispositivos. La Figura 14 muestra una estructura de este tipo.

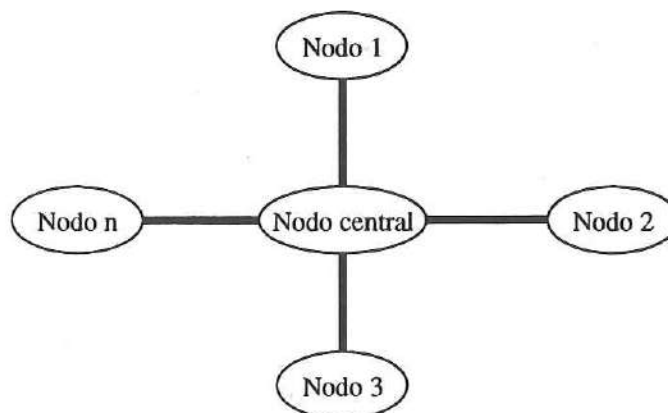


Figura 14: Estructura en estrella.

3.3.1.3 Estructura en árbol.

Este tipo de estructura representa un compromiso entre las ventajas y desventajas de las dos estructuras anteriores. En la Figura 15 se muestra una estructura de este tipo.

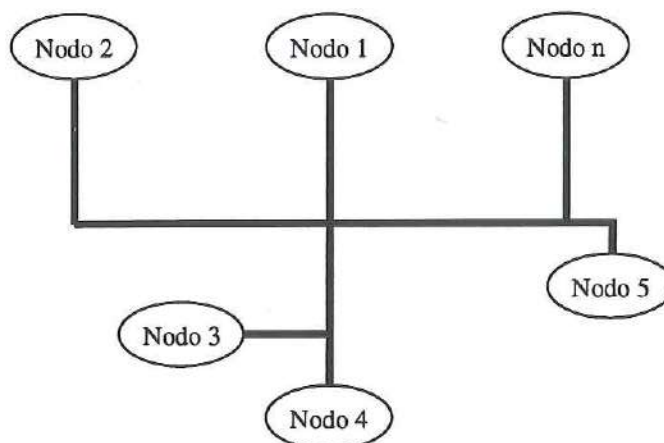


Figura 15: Estructura en árbol.

Todos los nodos están conectados en paralelo sobre la misma línea, y no en serie como los sistemas en anillo. Esta característica es la que permite a las redes de este tipo seguir funcionando en caso de fallo de un nodo, y también poder agregar nuevos elementos sin necesidad de interrumpir las comunicaciones. Gracias a su flexibilidad y facilidad de inserción de nuevos elementos en la red, ésta es la estructura más usual en los sistemas de comunicaciones de campo.

La Tabla 5 resume las principales características de las estructuras antes mencionadas.

	En estrella	En anillo	En árbol (bus)
Longitud de red	Media a grande	Grande, muy grande	Segmento único: Pequeña a grande Múltiples segmentos: Grande, muy grande
Método de acceso utilizado	Interrogación maestro / esclavo	Paso de testigo	Interrogación CSMA/CD Paso de testigo Maestro de bus
Velocidad (1997)	Puede llegar hasta 600 Mb/s	16 Mb/s (cobre) 100 Mb/s (FDDI) 600 Mb/s (MAN)	10 Mb/s (cobre) 100 Mb/s (cobre y fibra) 400 Mb/s (banda ancha) 1000 Mb/s (propuesta)
Ventajas	Fácil de actualizar. Un solo punto de seguridad	Segmentos punto a punto Gran longitud de tramas	Flexibilidad Facilidad para agregar o remover nodos
Desventajas	Un punto crítico de falla No acepta comunicaciones par a par	Poca flexibilidad Alto costo por nodo	Difícil de actualizar

Tabla 5: Principales características de las estructuras de redes.

3.3.1.4 Conclusiones.

Para los sistemas de integración a nivel de campo generalmente se utiliza la topología en árbol, por ser la que permite la mayor flexibilidad a la hora de realizar cambios en la red. También hay que considerar que en este tipo de topología si un nodo queda fuera de servicio la red no se ve afectada, a no ser que sea el maestro en las redes maestro / esclavo.

3.4 Protocolos de control de acceso al medio.

En las interconexiones de dispositivos industriales formando redes, en las cuales se utiliza un canal o medio de transmisión común se debe implementar un protocolo de control de acceso a éste, con el fin de garantizar que los nodos que lo tomen no tengan problemas de interferencias con otros nodos.

A continuación analizamos los protocolos más utilizados para controlar el acceso al medio, si bien es de resaltar que se analiza el protocolo en su forma más simple, pudiendo existir otros con variaciones o combinaciones de ellos.

3.4.1 Protocolos orientados a la conexión.

Estos protocolos han sido ampliamente utilizados en los inicios del auge de los ordenadores, y mucho antes de que las Redes de Area Local (LANs) se utilizaran a gran escala.

Este tipo de protocolo acepta solamente dos nodos, conectados al medio físico de transmisión vía módem con líneas serie. En la Figura 16 se muestra un ejemplo para cuatro procesadores que hacen uso de este protocolo. La comunicación entre nodos no conectados físicamente requiere múltiples transmisiones a través de nodos intermedios. Los sistemas de este tipo son deterministas entre los nodos conectados directamente, pero para los nodos conectados indirectamente, a través de otros nodos, la latencia puede ser grande.

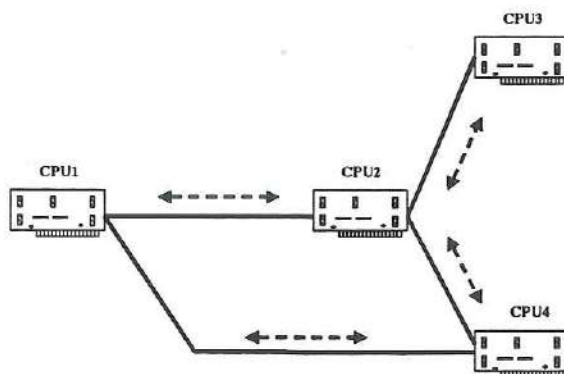


Figura 16: Red utilizando protocolo orientado a la conexión.

Para comunicaciones a nivel de planta donde se requieran modestas prestaciones, ésta puede ser una manera aceptable de implementarlas. En cambio se vuelve prohibitiva en sistemas con

gran cantidad de elementos a conectar, pues se tendría que tener conexiones punto a punto entre todos los elementos del sistema.

Este tipo de protocolos es utilizado en las redes públicas X25 y en alguna arquitectura de red de sistemas IBM como la SNA (*System Network Architecture*) [Tan89].

3.4.2 Sondeo secuencial (*Polling*).

Este tipo de protocolo es uno de los más utilizados, en el área de los sistemas de comunicación de campo, así como en otras aplicaciones industriales, ya que es muy simple y determinista. En este protocolo, un nodo central realiza interrogaciones periódicas, enviando un mensaje de interrogación - o sondeo -, a cada uno de los nodos esclavos, otorgándoles permiso de acceso a la red.

En la Figura 17 se presenta un ejemplo de sondeo periódico, mostrado en líneas punteadas, que es realizado por un maestro a tres nodos esclavos. La mayor cantidad del software del protocolo reside en el maestro, por lo tanto, el trabajo de comunicación de los esclavos es reducido, dando como resultado que el costo hardware de éstos sea bajo.

Este sistema es ideal para adquisición de datos centralizada, en los entornos industriales a nivel de planta, donde no se requiere comunicación uno-a-uno ni priorización global.

Deja de ser útil en entornos donde se requiere comunicación punto a punto y fiabilidad en cuanto a funcionamiento del maestro (en este sistema si el maestro falla toda la red deja de funcionar). Además hay que tener en consideración que la interrogación periódica por parte del maestro, consume considerable ancho de banda disminuyendo el ancho de banda efectivo de la red y disminuyendo por tanto su eficiencia.

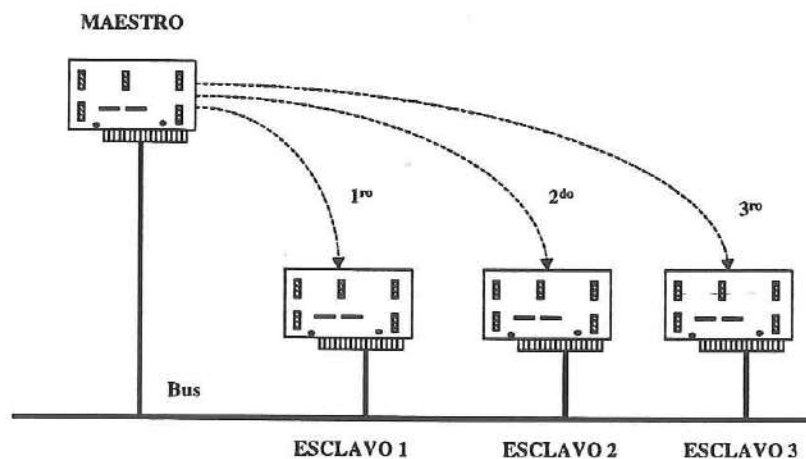


Figura 17: Sondeo secuencial del maestro a los esclavos.

Este protocolo ha sido estandarizado para uso militar [MIL1553] en subsistemas de comunicación de aviones. Existen también algunas variaciones de este protocolo que permiten la comunicación entre esclavos a través del maestro.

Quizás la variación más notable es la realizada por PROFIBUS [DIN19245], muy utilizada en el entorno industrial, que aparte de permitir el intercambio de información entre esclavos aumenta la fiabilidad del sistema por el uso de múltiples maestros.

3.4.3 Multiplexado por división de tiempo (*Time Division Multiple Access TDMA*).

Este tipo de protocolo es muy utilizado en el área de las comunicaciones por satélites [Stal91], pero también es muy utilizado en redes dentro del entorno industrial. En este tipo de protocolo un maestro de red emite una trama de sincronismo, antes de cada ciclo de mensajes, para sincronizar los relojes de todos los nodos. Luego de la etapa de sincronización cada nodo transmite solamente durante el intervalo de tiempo que tiene asignado, tal como se muestra en la Figura 18.

Las prestaciones podrían ser consideradas similares a las del protocolo de sondeo (*polling*) con mejor eficiencia cuando la carga del bus es grande, por el hecho de no tener tramas de sondeo individuales.

Los nodos son más costosos que los utilizados en los protocolos de interrogación, ya que cada nodo debe tener un reloj muy estable, para asegurar la duración del intervalo de tiempo que utiliza dentro del ancho de banda del sistema. Otra desventaja que podemos resaltar, al implementar este tipo de protocolo, es que los mensajes tienen que tener longitud fija para entrar dentro del intervalo de tiempo de transmisión que tiene asignado cada nodo.

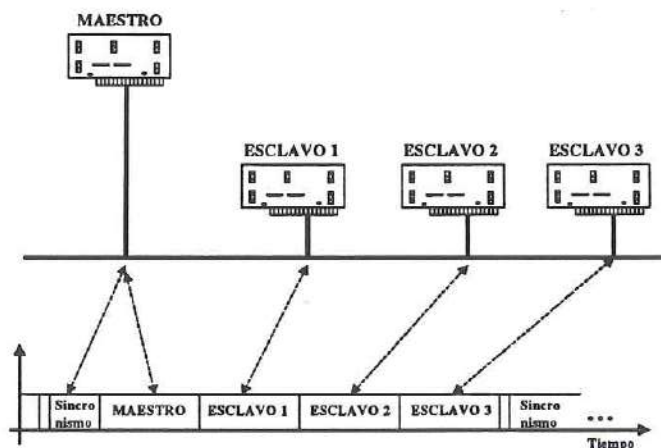


Figura 18: Intervalos de tiempo asignados en un protocolo TDMA.

3.4.4 Protocolos con paso de testigo.

Los protocolos con paso de testigo son básicamente dos: el de paso de testigo en anillo (*Token Ring*) y el de paso de Testigo en Bus (*Token Bus*). Estos dos se caracterizan por que en las redes circula una trama especial, el testigo - *Token* -, que sirve para garantizar, a las

estaciones que lo poseen, el derecho a utilizar el medio de transmisión. Terminada la operación, el testigo es liberado y pasado a otra de las estaciones en el bus.

3.4.4.1 Testigo en anillo (*Token Ring*).

En las redes que utilizan paso de testigo en anillo - *Token Ring* - los nodos están conectados en una estructura que asemeja un anillo construido con enlaces punto a punto, tal como se muestra en la Figura 19. Como se explicó antes, cuando un nodo tiene algo que enviar se apropia del testigo, si es que está en circulación en la red, envía su mensaje a través de todo el anillo y finalizada la operación pasa el testigo a la siguiente estación de la red.

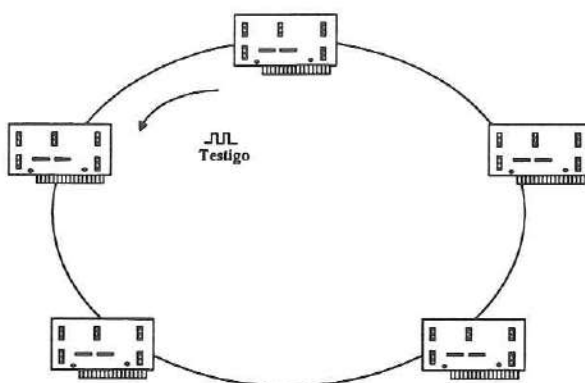


Figura 19: Paso de testigo en una red a anillo.

Este protocolo es determinista y el peor caso de espera del testigo puede ser calculado fácilmente. Bajo condiciones de tráfico moderado el testigo sólo representa una pequeña sobrecarga. Para condiciones de cargas de red grandes el protocolo proporciona un mecanismo eficiente para minimizar el paso del testigo a las estaciones que no tienen nada que enviar. Para implementar esto normalmente se añade al testigo un bit de prioridad por cada nodo de la red, bit que será variado por su correspondiente nodo cuando tiene el testigo, obteniendo así información sobre las prioridades globales de todos los nodos de la red. Si en la red existen N nodos y la longitud del testigo es de T bits, entonces es posible que el testigo pueda visitar todos los nodos en el tiempo equivalente a $(T + N)$ bits, ya que el campo creado con los bits adicionales por cada nodo habilitará solamente al nodo de mayor prioridad para transmitir su mensaje a la red.

Los principales inconvenientes de este protocolo se originan en la gestión inicial del testigo, detección de pérdida del testigo y en la gestión de duplicaciones accidentales del mismo. Introducir mecanismos para evitar los inconvenientes antes mencionados incrementa notablemente la complejidad y el costo de una red de este tipo.

Otros inconvenientes a tener en cuenta en los entornos industriales, son que una rotura en el cable de interconexión, o fallo en cualquiera de los nodos, incapacita todo el sistema. Si se quiere evitar esto, para hacer la red más fiable, es necesario dotar a cada nodo de mecanismos hardware de *bypass* de datos y colocar anillos duales con el consiguiente incremento en el coste del sistema.

Debido a su característica de conexionado punto a punto, este tipo de red es muy utilizada en donde se utiliza fibra óptica, por ejemplo FDDI (*Fiber Distributed Data Interface*).

3.4.4.2 Paso de testigo en bus (*Token Bus*).

El funcionamiento del tipo de redes que utilizan paso de testigo en bus es bastante similar al utilizado por las redes en anillo y paso de testigo, ya que el testigo pasa de un nodo a otro en un anillo virtual, tal como se muestra en la Figura 20. La diferencia radica en que el testigo pasa por emisión y difusión a todos los nodos de la red, en lugar de bit a bit a través de cada nodo.

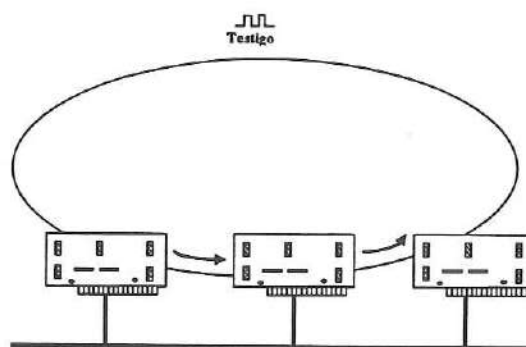


Figura 20: Paso de testigo en una red tipo bus.

El nodo que tiene el testigo es el que tiene acceso al bus. El comportamiento frente a las condiciones de carga del bus es similar al descrito para la red en anillo, es decir, las prestaciones disminuyen notablemente cuando la carga aumenta. La priorización global de la red es en este caso menos eficiente pues el paso del testigo a todos los nodos de la red implica un tiempo total igual a $(N \times T)$ [Bhar94], mayor que el que se necesita en una topología en anillo.

Debido al tipo de topología en bus que emplea, este sistema es muy utilizado en los entornos automatizados, gracias a que con esta configuración si un nodo queda fuera de servicio el resto del sistema no se ve afectado. Un ejemplo de red que utiliza este tipo de protocolo, para redes de control de procesos industriales, es ARCnet (*Attached Resource Computer Network*) [HoKa88].

3.4.5 Protocolos cuenta atrás binario (*Binary Countdown*).

En este tipo de protocolo los nodos esperan que el bus esté en reposo antes de empezar a transmitir sus mensajes. El derecho de acceso al medio, cuando existe transmisión simultánea por dos o más nodos, se resuelve con los bits iniciales de los mensajes de los nodos que tratan de acceder al bus. Estos bits iniciales – llamados bits de identificación de mensaje –, que deben ser únicos para cada nodo, deben ser transmitidos en cada una de las conexiones que el nodo trate de realizar.

Para lograr la resolución de las posibles colisiones, el medio de transmisión debe tener como característica que uno de los valores que puede tomar un bit - cero o uno - sobrescriba al otro; en otras palabras que uno de los valores que puede tomar un bit sea dominante frente al otro, que llamamos recesivo. Así cuando una estación transmite un bit recesivo de su identificador de mensaje, pero monitorizando el bus ve un bit dominante entonces se detecta la colisión. La estación reconoce que el mensaje que estaba transmitiendo no es el de más alta prioridad en el sistema, detiene su transmisión, y espera hasta que nuevamente el bus quede libre. Si la estación transmite un bit recesivo y ve un bit recesivo en el bus entonces puede que esté transmitiendo el mensaje de más alta prioridad, y procede a transmitir el siguiente bit del campo de identificación. Debido a que se requiere que los identificadores sean únicos dentro del sistema, una estación que transmite, sin detectar colisiones, el último bit (bit menos significativo) de su identificador estará transmitiendo el mensaje de más alta prioridad de la cola de mensajes, y puede iniciar la transmisión del cuerpo del mensaje (si los identificadores no fuesen únicos dos estaciones intentando transmitir mensajes diferentes con el mismo identificador pueden causar una colisión después de que el proceso de arbitraje ha finalizado, y puede ocurrir un error).

Un ejemplo de uso de este protocolo son las redes CAN (*Control Area Network*) [CAN2.0]. Con CAN, si múltiples estaciones están transmitiendo al mismo tiempo y una transmite un bit "0", entonces todas las demás que monitorizan el bus verán el "0". A la inversa, sólo si todas las estaciones transmiten un 1, todos los procesadores que monitorizan el bus verán este "1". En la terminología de CAN, un bit "0" se llama dominante, y a los bits "1" se les conoce como recesivos. El bus CAN actúa como una gran puerta AND cableada con cada estación capaz de ver la salida de la puerta.

En la Figura 21 se muestra un ejemplo de acceso al medio de tres nodos CAN con este protocolo. En este ejemplo el nodo 2 gana la competencia por el bus, ya que su bit dominante número 7 sobrescribe al bit recesivo correspondiente del nodo 1; e igualmente su bit dominante número 3 sobrescribe al bit correspondiente recesivo del nodo 3.

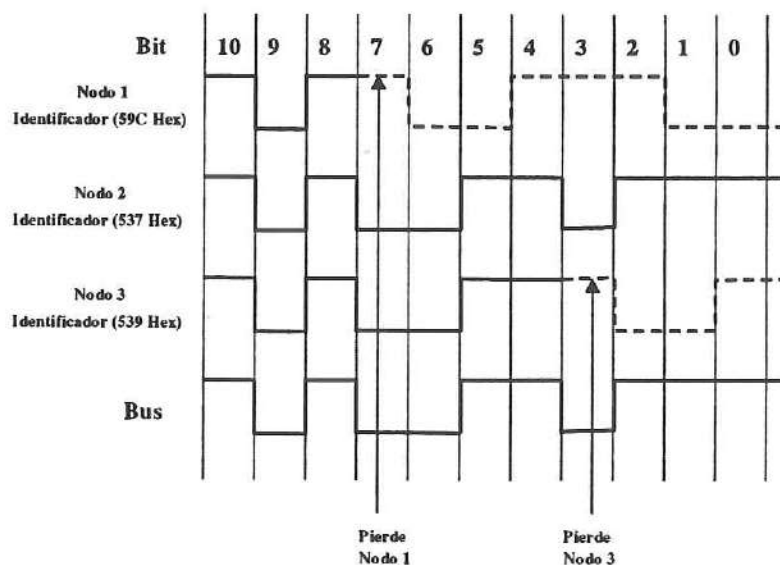


Figura 21: Protocolo cuenta atrás binario.

Otras de las ventajas, que podemos citar de esta forma de acceso al medio, son: que las estaciones que no están presentes no afectan en nada al sistema, y que no se requiere configuración de nodos ni orden de transmisión.

3.4.6 Accesos múltiples por detección de portadora (*Carrier Sense Multiple Access CSMA*):

Cada estación escucha el tráfico en el bus. Una estación que desea transmitir debe esperar hasta que no detecte tráfico antes de iniciar la transmisión. Si otra estación transmite simultáneamente, ambos paquetes de datos pueden corromperse, por lo que se incluye un mecanismo para detectar las colisiones y abortar ambas transmisiones. Luego de detectada la colisión ambas estaciones deben implementar mecanismos para intentar de nuevo obtener el acceso al bus con mayores probabilidades de éxito.

Seguidamente damos una descripción breve de los dos protocolos CSMA más conocidos.

3.4.6.1 CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*).

El protocolo CSMA/CD es uno de los que ha experimentado más estudios y variaciones a lo largo de su existencia [Tane91]. En el caso más simple, un nodo espera que el bus esté en reposo, ningún nodo transmitiendo, para empezar a transmitir. Si se da el caso de que más de una estación inicien su transmisión al mismo tiempo se produce una colisión, como se muestra en la Figura 22. En este caso los nodos deben ser capaces de detectar la colisión y luego resolverla esperando nuevamente, por el reposo del bus, un tiempo aleatorio antes de reintentar su transmisión.

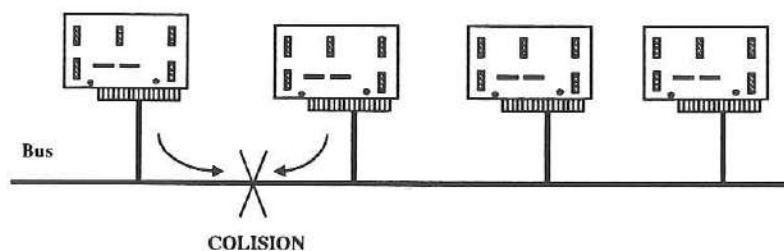


Figura 22: Colisión en una red CSMA/CD

La principal ventaja de este protocolo es que en principio puede soportar un número ilimitado de nodos, los cuales no requieren una reserva o inclusión dentro de mecanismos de paso de testigo. De esta manera CSMA/CD permite la conexión y desconexión de nodos sin requerir iniciación o configuración de la red.

Para condiciones de poco tráfico en el bus es una opción aceptable, pero a medida que se incrementa el tráfico aumentan las colisiones y sus prestaciones disminuyen notablemente.

Este protocolo no es utilizado en entornos industriales que requieran tiempos de acceso al medio garantizados.

3.4.6.2 CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*)

Se han realizado muchos trabajos para desarrollar protocolos híbridos que combinen las prestaciones de CSMA/CD en condiciones de bajo tráfico de bus, con las grandes prestaciones que tienen los protocolos basados en paso de testigo ante condiciones de tráfico de bus elevado. Los protocolos obtenidos de estos trabajos se pueden clasificar como protocolos CSMA con algoritmos para tratar de evitar las colisiones: CSMA/CA.

En este tipo de protocolos, al igual que en CSMA/CD, los nodos transmiten luego de detectar que el bus está libre. Sin embargo, si dos o más estaciones transmiten al mismo tiempo, produciendo una colisión, se envía a la red una señal de interferencia que notifica a todos los nodos que se ha producido la colisión; a partir de este momento los nodos sincronizan sus relojes y arrancan un intervalo de tiempo para acceder al bus. Estos intervalos de tiempo para tratar de acceder al bus, son asignados de manera particular a cada estación; y a cada una de las estaciones solamente se le permite iniciar la transmisión durante su intervalo de tiempo de acceso asignado.

En la Figura 23 se muestra un ejemplo, en el tiempo, de 2 estaciones que colisionan e inician la señal de interferencia. Seguidamente al envío de la señal de interferencia vienen los intervalos de tiempo para acceso al bus asignados a cada una de las estaciones. En el ejemplo se supone que el nodo 1 no tiene nada que enviar, por consiguiente su intervalo de tiempo asignado se termina, y el nodo agota la posibilidad de quedarse con el bus. Seguidamente corresponde al nodo 2 transmitir, en este caso suponemos que tiene algo que transmitir por consiguiente se queda con el bus, las otras estaciones detectan que está transmitiendo y detienen la progresión de tiempos de acceso. Una vez terminado el mensaje los nodos reinician el acceso tomando el bus en los intervalos de tiempo que tienen asignados para tal fin.

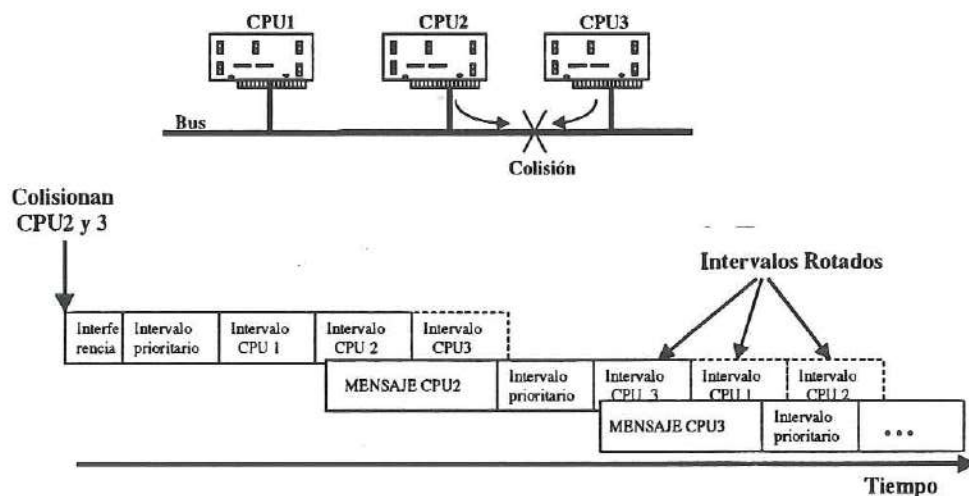


Figura 23: Progresión de intervalos de acceso en una red CSMA/CA.

Los intervalos de tiempo se rotan para asegurar que todos los nodos tienen acceso al bus de forma imparcial. Es decir se les asigna una nueva posición en la secuencia de acceso. En el ejemplo se muestra un intervalo de tiempo que es prioritario, que puede existir y preceder a todas las secuencias de acceso, que permite la posibilidad de mensajes prioritarios. La red entra en estado de reposo cuando todos los intervalos de tiempo de acceso no son utilizados.

De esta manera los intervalos de tiempo de acceso, asignados a cada uno de los nodos, ayudan a evitar las colisiones. Existen dos variaciones importantes de este tipo de protocolo.

- Si el número de intervalos de tiempo de acceso es igual al número de estaciones, el protocolo se conoce como RCSMA (*Reservation CSMA*). Este protocolo modificado se comporta de manera aceptable bajo todas las condiciones de tráfico de red [Chen89]. El inconveniente que presenta es que el número de intervalos de tiempo, asignados para acceder al bus, es igual al número de nodos; por consiguiente no es aplicable a redes con una gran cantidad de nodos.
- Otra versión designa un número de intervalos de acceso menor que el número de estaciones. En este caso la asignación, a cada estación, del intervalo de acceso se realiza de forma aleatoria para minimizar las colisiones. Si bien este tipo de acceso no es determinista uno de los buses industriales – el LONwork [LON91] (*Local Operating Network*) –, muy utilizado en América, hace uso de una variación del mismo. LONwork hace una modificación al protocolo asignando dinámicamente el número de intervalos de tiempo de acceso, basados en una predicción del tráfico esperado.

Haciendo uso de estos protocolos, a diferencia de los CSMA/CD, se pueden obtener mecanismos para evitar el uso de hardware para detectar colisiones. Por ejemplo enviar mensajes fantasmas, para mantener los intervalos, en ausencia de tráfico en la red.

Seguidamente presentamos una tabla resumen con las principales características de los protocolos antes vistos.

Tipo de Protocolo	Eficiencia a bajo tráfico	Eficiencia a gran tráfico	Determinismo	Priorización global	Robustez	Flexibilidad del nivel físico	Costo por nodo	Nivel de uso dentro de CIM
Conexión	Media	Mala	Solo 1 a 1	Media	Excelente	No hay	Medio	No se usa
Interrogación	Mala	Buena	Si	No	Mala	Excelente	Medio	1-2
TDMA	Mala	Excelente	Si	No	Mala	Excelente	Bajo	2
Token Ring	Excelente	Excelente	Si	Excelente	Media	Media	Medio	1-2
Token Bus	Media	Excelente	Si	Media	Media	Excelente	Medio	1-2
Bit dominante	Excelente	Excelente	Si	Media	Excelente	Buena	Medio	1-2
CSMA/CD	Excelente	Mala	No	Media	Excelente	Excelente	Medio	3-4
CSMA/CA	Excelente	Excelente	No	Excelente	Excelente	Excelente	Alto	2-3-4

Tabla 6: Comparación de los protocolos de control de acceso.

3.4.7 Discusión y conclusiones.

En los apartados anteriores, hemos presentado una breve descripción de los protocolos de control de acceso al medio más utilizados en aplicaciones industriales. En cada punto se han citado las principales ventajas e inconvenientes para su utilización en entornos automatizados,

donde muchas veces hace falta que se garantice el tiempo de acceso al medio, para cumplir las restricciones de tiempo que se pueden presentar en este tipo de entornos.

De lo expuesto en cada punto se pueden obtener las siguientes conclusiones:

1. No existe un protocolo que se adapte completamente a los requerimientos de los sistemas automatizados; en otras palabras, no hay un protocolo que se pueda definir como "ideal" para este tipo de entornos.
2. Dependiendo de la cantidad de tráfico que exista en la red – que es función de la posición que tenga la red dentro de los niveles de los sistemas de comunicación industriales -, y del número de nodos de la misma, se puede hacer una selección más detallada de los protocolos que más se adecuen para el tipo de requerimiento específico.
3. Las redes que implementen CSMA/CD quedan descartadas en los casos donde se tengan que cumplir restricciones de tiempo.
4. Algunas redes con protocolos CSMA/CA, como por ejemplo LONwork, se pueden utilizar en niveles, definidos dentro de la pirámide de automatización, en donde las restricciones de tiempo lo permitan. Cabe señalar que si bien este protocolo no es determinista, presenta una buena opción en muchas aplicaciones [Eche95] por ejemplo en redes que utilizan como medio físico las redes de transmisión de energía eléctrica.
5. Es necesario también considerar el costo de las interfaces para cada nodo. Esto es particularmente importante en los niveles de planta donde normalmente se utilizan muchos dispositivos conectados a las redes.
6. Para el nivel donde creamos y aplicamos la metodología propuesta en este trabajo, nivel de campo, los protocolos más adecuados son los que garantizan que se cumplan las restricciones de tiempo de este entorno; es decir descartamos los protocolos CSMA/CD y CSMA/CA con la funcionalidad antes descrita.
7. El control de acceso al medio empleado por CAN, es un protocolo que se puede catalogar dentro de los CSMA/CA, ya que, al igual que toda esta familia de protocolos, los nodos escuchan antes de empezar una transmisión. Pero a diferencia de otros, por ejemplo de LONwork, es completamente determinista, puesto que, utiliza el algoritmo cuenta abajo binario, que permite resolver las colisiones sin que se necesite retransmisiones, ni mecanismos especiales de sincronización.

3.5 Modelos de operación de redes de comunicación.

Hasta ahora hemos analizado y comparado los medios físicos, protocolos serie, topología, y mecanismos de control de acceso al medio que más se utilizan en los sistemas de comunicación de campo. Indicamos a continuación los principales modelos de operación de redes que pueden ser encontrados en este área.

3.5.1 Maestro / esclavo.

Este es el modelo de operación de red que presentan una de las formas más simples de establecer el acceso. Consiste en asignar el papel de gestor de red a un nodo específico que se denomina maestro. Este nodo es el único que tiene el poder de decidir quién y cuándo puede acceder a la red. Todos los otros nodos de la red, llamados esclavos, están en constante recepción.

En este tipo de mecanismo generalmente cada nodo tiene un número de identificación, conocido como dirección de nodo, que puede servir para hacer un filtrado, normalmente a nivel hardware, de todos los datos que circulan por la red y tomar sólo los que corresponden al nodo. Cuando el nodo toma sus datos, también le llega información sobre si tiene autorización para responder. En caso negativo vuelve a modo recepción.

Uno de los mecanismos que puede realizar el maestro para permitir a los nodos esclavos transmitir sus datos, es la interrogación cíclica.

Los sistemas de comunicación maestro / esclavo presentan la gran ventaja de que no existen problemas de acceso a la red, pues éste es vigilado por el maestro del bus. La desventaja principal es que no existe comunicación entre nodos esclavos. Es necesario aclarar que existen muchas variaciones de este tipo de estructura que permiten por ejemplo, maestro alternativo, el cual luego de un tiempo de falta de comunicaciones toma el lugar del maestro principal. Muchas redes de este tipo también permiten el envío de mensajes por difusión (*broadcast*) del maestro a múltiples esclavos. En la Figura 24 se muestra una red de tres dispositivos esclavos, de entrada salida (E/S), junto con el maestro de bus. En cada esclavo se representa el número de ciclo de interrogación que le correspondería en una interrogación periódica.

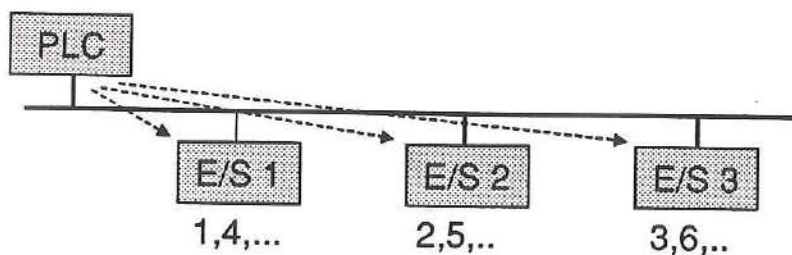


Figura 24: Ejemplo de red con mecanismo maestro / esclavo.

3.5.2 Par a par.

En este modelo generalmente se utiliza mecanismos de paso de testigo, por consiguiente cada estación puede enviar sus mensajes sólo cuando ella tiene el testigo.

El paso del testigo se basa en los números de los nodos (*round robin*), o bien en una lista prioritaria definida por el usuario. En este tipo de red no se necesita un nodo maestro.

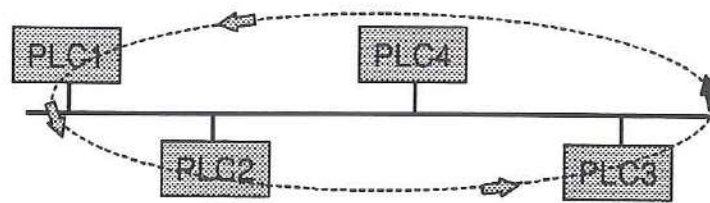


Figura 25: Comunicación par a par.

3.5.3 Multimaestro.

Este modelo de operación se diferencia de las maestro esclavo en que cada nodo tiene derecho a transmitir cuando lo requiera, aunque no puede interrumpir al bus si éste está ocupado. Si simultáneamente más de un nodo trata de transmitir cuando la red está en reposo, se pueden originar colisiones que deben ser tratadas de manera determinada para garantizar la funcionalidad de la red.

La principal ventaja de este modelo de operación es que permite la comunicación de cualquier nodo con cualquier otro dentro de la red. Aparte de la opción multimaestro, existen variaciones que permiten también multireparto, es decir que los datos enviados por un nodo alcancen a varios destinos. Un ejemplo de acceso multimaestro con multireparto se muestra en la Figura 26. En esta figura la transacción 1, que parte del módulo de E/S número uno, se envía a los nodos correspondientes, a los autómatas PLC1, PLC2 y PLC3 respectivamente; la transacción 2 corresponde a un dato que envía el PLC1 a los tres módulos de E/S 2, 3 y 4.

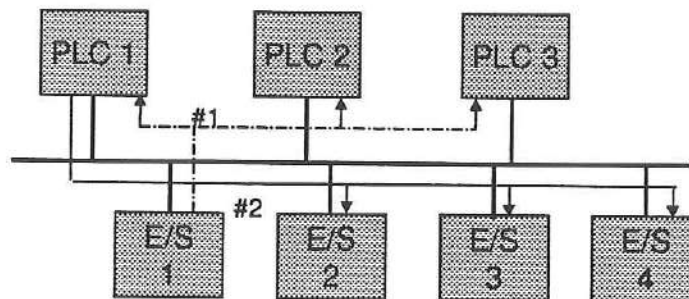


Figura 26: Mecanismo multimaestro con multireparto.

3.5.4 Cambio de estado de los datos.

En este caso, en lugar de que el maestro pregunte a los esclavos si tienen algo que transmitir, éstos comunican sus datos, de entrada o salida, cuando se produce un cambio de estado en los datos basados en los eventos del sistema. De esta manera se logra reducir de manera significativa el tráfico. Este tipo de red puede ser utilizada en ambientes maestro / esclavo, par a par, o multimaestro.

3.5.5 Producción cíclica de datos.

En este modelo los dispositivos comunican sus datos, de entrada o salida, a intervalos configurables por el usuario. Este tipo de redes es más eficiente en aplicaciones con cambios lentos de los dispositivos de entrada y salida.

Puede utilizarse en combinación con los modelos, par a par, o multimaestro. La Figura 27 representa el caso de producción de tres variables cíclicas, una cada 25 ms, producida por el grupo de entradas / salidas 1, otra cada 500 ms, producida por el PLC, y la última cada 2000 ms producida por el grupo de entradas / salidas 2.

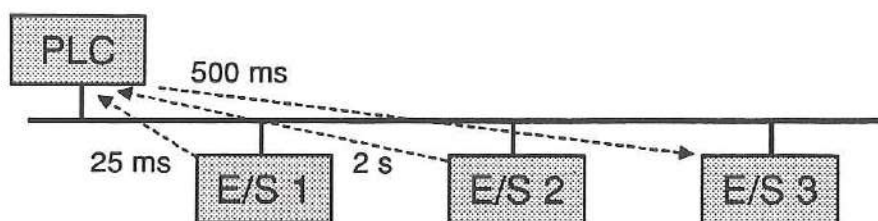


Figura 27: Producción cíclica de datos.

3.5.6 Conclusiones.

1. La sencillez de acceso a la red, por ejemplo en las redes maestro / esclavo, es una de las formas más baratas de implementación de redes, pues casi toda la inteligencia de gestión está centrada en el nodo maestro, y por consiguiente se logra obtener bajos costes en la fabricación de los dispositivos esclavos, que indudablemente son la mayoría.
2. El sistema maestro / esclavo, es el más utilizado en el nivel más bajo de los sistemas de comunicación de campo, por ejemplo entre un autómatas - maestro -, y sus salidas o entradas remotas interconectadas por un bus común. Pero a medida que subimos de nivel, nos encontramos con transferencias más largas, que muchas veces deben realizarse de nodo a nodo, las cuales ya no son tan eficientes con este tipo de mecanismos de operación de red. En este caso son más eficientes los mecanismos multimaestro que permitan multireparto.

Capítulo 4.

Redes de área local utilizadas en los entornos industriales.

Clasificar las redes de comunicación es siempre una tarea ardua, pues para ello se pueden utilizar diferentes criterios técnicos o económicos: medio utilizado, topología, velocidad de transmisión, distancia máxima, control de acceso al medio, ambiente soportado, número y tipo de estaciones, costo de una conexión, posibilidad de redundancia, etc. La clasificación se complica aún más si debemos considerar las redes empleadas en entornos industriales.

Dado que este trabajo está orientado a los sistemas de comunicación industriales, hemos dividido la clasificación en dos grandes grupos: en primer lugar las redes de propósito general que pueden ser utilizadas en este tipo de entornos, descritas en el apartado 4.1; y a continuación las redes de área local para uso industrial, descritas en el apartado 4.2, que tienen como característica principal el que algunas transferencias deben cumplir restricciones de tiempo propias de este tipo de entornos. Finalmente en los apartados 4.3 y 4.4 se analizan las redes más importantes, actualmente en uso en entornos automatizados.

4.1 Redes de área local de propósito general utilizadas a nivel de planta.

De las redes de área local LANs (*Local Area Networks*) de propósito general, algunas son utilizadas en las aplicaciones industriales. En este apartado presentamos las más utilizadas, indicando las ventajas e inconvenientes que presenta su utilización.

4.1.1 IEEE 802.3 (CSMA/CD).

El estándar IEEE 802.3 [IEEECS85] es la base del estándar *Ethernet* que utiliza CSMA/CD para acceder al medio físico. El rango de transmisión es de 10Mb/s utilizando cable coaxial de banda base en topología de bus. También existe la especificación para 100 Mb/s; y una propuesta para 1 Gb/s realizada en 1996. La capa de enlace de datos, capa 2 del modelo de referencia de OSI [OSI83], consistente en el control de acceso al medio se define en IEEE 802.3, y el control de enlace lógico se especifica en IEEE 802.2 [IEEEEL85].

La red IEEE 802.3 puede transferir datos en ráfagas de hasta 9 Mb/s, pero esta velocidad se reduce considerablemente si la red está muy cargada pues ocurren una gran cantidad de colisiones. Las colisiones repetidas pueden significar más del 60% de la carga aplicada en muchos sistemas. En estas circunstancias, el retardo de la transmisión se vuelve imprevisible haciendo que este tipo de red sea inapropiada para aplicaciones donde se requieran retardos en la transmisión garantizados.

4.1.2 IEEE 802.4 (*Token Bus*).

El estándar IEEE 802.4 [IEEEETP85], basado en el paso de testigo, está destinado a aplicaciones de automatización de fábricas y proporciona la capa 1 del modelo OSI y parte de la capa 2 del mismo modelo - la parte del control de acceso al medio de la capa de enlace de datos -, en el Protocolo de Automatización de Fabricación MAP (*Manufacturing Automation Protocol*) [Gene88][LaCr90][Alco92][VaDe92][ViBe94]. El IEEE 802.4 soporta dos tipos de medio: cable coaxial de banda ancha, con muchos canales a 5 o 10Mb/s; o cable como canal único, utilizando modulación en banda portadora.

El testigo es una pequeña trama que se mueve a través de la red. La posesión del testigo garantiza el derecho a transmitir. Si un nodo que recibe el testigo no tiene información que enviar, simplemente pasa el testigo a la siguiente estación. El tiempo de posesión del testigo está limitado por un periodo máximo de tiempo.

4.1.3 IEEE 802.5 (*Token Ring*):

El estándar IEEE802.5 [IEEEETR85] especifica un método de acceso y una especificación de capa física similar a la red *Token Ring* de IBM. Cuando una estación que posee el testigo tiene información que desea transmitir, se apropia del testigo, altera un bit del mismo, coloca al testigo modificado en el inicio de la secuencia de trama, añade la información a transmitir, y finalmente envía esta información a la siguiente estación en el anillo. Así la trama de información se pone en circulación dentro del anillo, y no existe testigo en la red (a no ser que el anillo soporte liberación anticipada del testigo), de tal manera que otra estación que desee transmitir debe esperar. Por lo tanto no existen colisiones en una red *Token Ring*. Si la red soporta liberación anticipada del testigo, se puede liberar un nuevo testigo en cuanto se completa la trama de transmisión.

La trama de información circula hasta que alcanza la estación de destino, la cual copiará la información para su posterior tratamiento. La trama de información continúa circulando en el anillo y se elimina cuando alcanza finalmente la estación que la originó. La estación de envío puede verificar la trama que retorna para ver si fue recibida y copiada por el destino.

A diferencia de las redes CSMA/CD (como por ejemplo Ethernet), las redes con paso de testigo son deterministas; es posible calcular el máximo tiempo que puede pasar antes de que una estación pueda ser habilitada para transmitir.

Esta característica, y otras relativas al manejo de fallos, hacen que las redes de este tipo sean ideales para aplicaciones donde el retardo pueda ser previsible y se necesite una operación de red robusta. Las aplicaciones de automatización industriales proporcionan frecuentes ejemplos de su utilización.

4.1.4 IEEE 802.7 (ANSI FDDI):

El estándar ANSI FDDI (*Fibre Distributed Data Interface*) [ANFD80] especifica un anillo de fibra óptica utilizando paso de testigo con una velocidad de 100Mb/s. El flujo de datos a 100Mb/s es la velocidad máxima que normalmente se puede lograr utilizando elementos ópticos de detección y emisión de poco costo.

Una red FDDI puede funcionar con 2 km, de fibra entre nodos, una circunferencia total de 200 km, y un máximo de 1000 nodos.

Los cables de fibra óptica permiten un gran rango de transferencia de datos y, dado que la atenuación es mucho menor que en los cables eléctricos, se pueden cubrir grandes distancias. Otros beneficios adicionales son su inmunidad al ruido eléctrico, a la caída de rayos, o al impulso electromagnético asociado a una explosión nuclear.

4.1.5 Discusión y conclusiones

1. Si bien en el entorno industrial se pueden encontrar todas estas redes, es de resaltar que a nivel de planta, donde se aplica la metodología propuesta en esta tesis, solamente se utilizan las redes con estándares IEEE 802.4 e IEEE 802.5, por cumplir los requerimientos de este tipo de entornos.
2. Actualmente las redes del tipo IEEE802.4 e IEEE802.5, están siendo reemplazadas por los nuevos buses industriales de campo, por las facilidades de configuración y flexibilidad que estos presentan. No obstante existen muchas aplicaciones en donde éstas han sido, y continúan, siendo implantadas.
3. Las redes IEEE802.3 son utilizadas algunas veces en aplicaciones que no presentan restricciones de tiempo, sobre todo en sistemas de pequeña dimensión - como es el caso de muchas industrias locales -, donde las necesidades de integración son solamente parciales.

4. El futuro de las redes de área local utilizadas en los entornos industriales, tiende hacia las redes conocidas como buses de campo. Pero, debido a que la utilización de este tipo de buses se ha empezado a extender recientemente, éstos coexistirán, por un tiempo considerable, con las aplicaciones realizadas con las redes de área local más generales.

4.2 Redes de área local industriales.

Para tratar de hacer un análisis simple pero completo de las Redes de Area Local Industriales – muchas veces conocidas como ILANs (*Industrial LANs*) –, presentamos primeramente, en 4.2.1, la clasificación más usual de este tipo de redes – clasificación según su jerarquía CIM - *Computer Integrated Manufacturing* - (Fabricación Integrada por Ordenador). Luego en 4.2.2 se presenta una clasificación más detallada [QuTh94], de acuerdo a algunos criterios como por ejemplo modelos de cooperación, gestión de tiempos en protocolos, etc. Esta última clasificación puede facilitar la selección adecuada de la red con respecto a las aplicaciones del usuario.

4.2.1 Clasificación según jerarquía CIM.

Dentro de la estructura del modelo de referencia CIM, las redes son clasificadas según la posición que ocupan dentro de la pirámide definida para este tipo de arquitectura. En la estructura de la pirámide CIM, representada en la Figura 28, se muestra que existe un gran número de estándares de comunicación; resultado de las exigencias, muy bien definidas, de los sistemas de comunicación de los diferentes niveles jerárquicos. Bajo estas consideraciones podemos clasificar los niveles de la pirámide de automatización en 4 tipos, partiendo de los niveles más bajos a los superiores, de la siguiente manera:

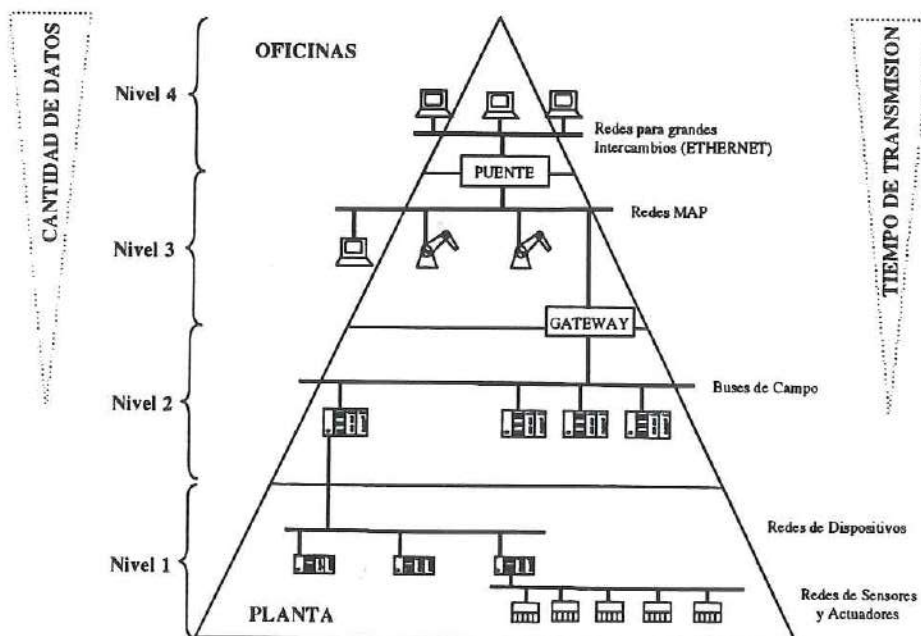


Figura 28: Pirámide CIM de automatización.

4.2.1.1 Nivel 1: Redes de dispositivos y de sensores/actuadores.

En el nivel más bajo de la pirámide, donde se encuentra una gran cantidad de dispositivos de campo como, sensores, actuadores, terminales de captura de datos, visualizadores, pequeños autómatas programables, estaciones de E/S, controladores de procesos, etc., las transferencias de datos son muy cortas, y algunas veces los requerimientos de tiempos son de pocos microsegundos.

Este nivel se puede dividir en dos partes, los **buses o redes de dispositivos** (*Device buses*) – que soportan algunos bytes de datos -, por ejemplo CAN (*Control Area Network*), y los **buses de sensores y actuadores** (*Sensor actuator buses*) cuyas transferencias de datos son a nivel de bits (por ejemplo SERIPLEX).

4.2.1.2 Nivel 2: Buses de campo (*fieldbus*).

Según la definición clásica podemos decir que los buses de campo son redes digitales [HuLá89, RuDe94], que utilizan normalmente como medio físico un par de cables trenzados de bajo coste, que posibilitan la transferencia de información entre dispositivos de campo (sensores, actuadores, terminales de captura de datos, visualizadores, etc.) y equipos de control (autómatas programables, estaciones de E/S, controladores de proceso, sistemas de supervisión, etc.). Tomando en cuenta esta definición todos los buses industriales, que cumplen restricciones de tiempo, podrían ser agrupados dentro de esta clasificación. Pero el comité de estandarización del IEC (*International Electrotechnical Commission*), para buses de campo (*fieldbuses*), ha definido como tales a los que tienen capacidad de datos de 100 o más bytes. Por esta razón solamente consideramos en este nivel los buses que cumplen esta condición, y los llamaremos **buses de campo** (*fieldbuses*), como por ejemplo PROFIBUS, FIP, etc.

4.2.1.3 Nivel 3: Redes de células de producción.

Estos tipos de redes se utilizan para los intercambios entre células de producción o entre controladores de máquinas herramienta, de grandes autómatas, etc. Estas redes se encuentran esencialmente en aplicaciones de manufactura. Es en este nivel donde se sincronizan las diversas áreas de producción.

A este nivel las más utilizadas son las redes MAP (*Manufacturing Automation Protocol*) [FuA192] [MAP3.0]. Las características principales del sistema son el servicio de mensajería puesto a disposición de las aplicaciones MMS (*Manufacturing Message Specification*), y la definición de la máquina virtual VDM (*Virtual Manufacturing Device*) que permite representar de manera abstracta el comportamiento de las máquinas reales [ISO9506-1] [ISO9506-2] [BrDa91].

4.2.1.4 Nivel 4: Redes principales de gestión (*backbone*).

Para completar la pirámide solamente hace falta la parte superior de los sistemas de comunicación. Para este nivel se utilizan redes estándar que permitan una gran cantidad de flujo de datos, pero sin problemas de restricciones de tiempo, por ejemplo ETHERNET con TCP/IP. Estas redes interconectan todos los niveles de gestión de la producción, y normalmente utilizan puentes (*bridge*) para la conexión al nivel de célula de producción.

También se podrían distinguir otras redes basadas en otros criterios como el dominio de aplicación: **redes para automatización de vehículos, redes para automatización de edificios**, o más generalmente redes instaladas en satélites, coches, trenes, etc. Estas redes son similares a los buses de campo, y puede aplicárseles la misma clasificación industrial.

4.2.2 Consideraciones para una clasificación detallada.

Las definiciones anteriores no permiten ningún conocimiento de los servicios necesarios para cada uno de los tipos de redes definido. Estas proporcionan solamente información de los tipos de máquinas que pueden ser conectadas, o sobre los campos de aplicación de las mismas, siendo muchas veces estos criterios insuficientes para dar una clasificación exhaustiva de este tipo de redes. Seguidamente se analizan algunos criterios, teniendo en consideración las necesidades de las aplicaciones industriales en cuanto a sistemas de comunicación, con los cuales se puede obtener una clasificación más precisa de las redes industriales.

Se presenta una clasificación de ILANs de acuerdo a algunos criterios como modelos de cooperación, gestión de tiempos en protocolos etc., resultado del análisis de algunos requerimientos típicos de las aplicaciones en tiempo real. Esta nueva clasificación no solamente facilita la selección de la red adecuada con respecto a las aplicaciones de usuario sino que también lleva a la definición de algunos perfiles propios de la operación en tiempo real.

4.2.2.1 Características de las redes de tiempo real.

Una red se llama de tiempo real cuando es capaz de proporcionar servicios de tiempo restringido. Ésto significa en primer lugar que cuando un usuario (en el sentido OSI) requiere un servicio, ella es capaz de especificar una restricción de tiempo asociada. En segundo lugar significa que tenga disponible mecanismos para gestionar estas restricciones de tiempo.

La propuesta para definir, de manera detallada, los estándares en el campo de las comunicaciones industriales se enmarca dentro de los puntos siguientes:

- Definición de los modelos de cooperación.
- Expresión de las restricciones de tiempo.
- Definición de la gestión de tiempo en los protocolos.

4.2.2.2 Definición de los modelos de cooperación.

En las aplicaciones en tiempo real, podemos identificar cuatro tipos de relaciones entre los procesos de aplicación, y por cada uno de ellos, se pueden considerar dos tipos de modelos de cooperación. Las relaciones se refieren al número de APs en juego, y los tipos de cooperación a la forma en que los APs pueden cooperar.

Las relaciones y sus modelos de cooperación están indicadas en la Tabla 7.

Relaciones		Tipos de cooperación		Modelos
Uno a uno (1-1)		Cliente Servidor (CS)		cliente - servidor y productor - consumidor
		Productor Consumidor (PC)		
Uno a Muchos	(1-N)	Cliente Servidor (CS)		multicliente - servidor y productor - consumidores
		Productor Consumidor (PC)		
	(N-1)	Cliente Servidor (CS)		cliente - multiservidores y productores - consumidor
		Productor Consumidor (PC)		
Muchos a muchos (N-M)		Cliente Servidor (CS)		multiclientes - multiservidores y productores - consumidores
		Productor Consumidor (PC)		

Tabla 7: Modelos de cooperación entre APs.

El modelo cliente servidor (CS): En este tipo de modelo se le permite a un proceso (cliente) pedir un servicio a otro (servidor) y eventualmente esperar por la respuesta.

El modelo productor consumidor (PC): En este tipo de modelo se le permite a un proceso (productor) enviar información a otro (consumidor).

Con el modelo CS se puede proporcionar una gran cantidad de servicios, por ejemplo un cliente puede pedir a un servidor la carga de un programa y la confirmación de la misma. En cambio en el modelo PC, solamente se realizan intercambios de información sin considerar su semántica; pues los consumidores están definidos previamente y para todos los demás elementos del sistema la información intercambiada no tiene porque ser entendida (tiene un formato predefinido por el productor y los consumidores).

4.2.2.3 Expresión de restricciones de tiempo.

En las redes de este tipo se pueden ser considerar dos casos de restricciones de tiempo:

1. Las que se dan explícitamente por el usuario; lo que significa que tienen requerimientos, indicaciones, confirmaciones las cuales son cualificadas por atributos de tiempo.
2. Las que no están dadas de manera previa, pero se puede calcular por sintonización de algunos parámetros particulares, por ejemplo el tiempo de mantenimiento del testigo en los sistemas que utilizan control de acceso al medio de este tipo. En este caso, el usuario tiene menos posibilidades y menos información acerca del cumplimiento de las restricciones. La sintonización de parámetros puede ser aplicada a todas las clases de entidades (mensajes en

la capa de transporte, tramas en la capa MAC, etc.), pero no a un servicio [SiSo93] [SoMa94].

Debido a que las redes deben garantizar el cumplimiento de las restricciones de tiempo consideramos sólo el primer caso. Lo más importante es definir las propiedades relativas a las restricciones de tiempo de los servicios de acuerdo a estos modelos de cooperación. Por ejemplo seguidamente se enumeran algunas de ellas:

1. Un servicio debe ser liberado dentro de un retardo determinado.
2. Muchos servicios distribuidos deben ser liberados al mismo tiempo.
3. Muchos procesos de una aplicación distribuida deben arrancar al mismo tiempo.
4. Muchos clientes deben tener el mismo resultado para requerimientos simultáneos idénticos.
5. Muchos servidores deben ser activados al mismo tiempo.
6. Muchos productores deben computar sus resultados al mismo tiempo.

El primer criterio a tener en cuenta es la clase de relaciones proporcionadas a la capa de aplicación por una arquitectura de comunicación. Otro criterio importante es la capacidad para soportar expresiones de restricción de tiempo.

4.2.2.4 Gestión de tiempo explícita en los protocolos.

Cuando se especifica una restricción de tiempo, asociada a un servicio pedido por un proceso de aplicación, éste debe ser manejado por el protocolo, con la finalidad de poder indicar si la restricción ha sido cumplida o no, o que no será cumplida. Al respecto se han implementado y probado algunos experimentos en el bus de campo FIP [SaMa95][LoMa95].

También se han definido otros mecanismos dentro de un contexto más general [SaTh93], que son apropiados para los modelos productor(es) - consumidor(es) y cliente(s) - servidor(es). Se basan en el concepto de ventana de tiempo en la cual pueden ocurrir eventos. Estas ventanas de tiempo pueden ser manejadas como intervalos de tiempo relativos o de tiempo absoluto. Pueden necesitarse algoritmos de sincronización de reloj, particularmente en el caso de que dos (o más) eventos relativos sean localizados en sitios diferentes.

Se pueden distinguir dos clases de protocolos en tiempo real, que soportan explícitamente expresiones de restricción de tiempo:

- Aquellos en los cuales las restricciones de tiempo se especifican antes del tiempo de ejecución, por ejemplo en la etapa de configuración. Así llevamos una gestión estática de las restricciones de tiempo.
- Aquellos en que las restricciones de tiempo están dadas en la petición del servicio. En este caso la gestión de las restricciones es dinámica.

Estos aspectos estáticos y dinámicos constituyen un subcriterio para la clasificación de las redes cuando está permitida la gestión del tiempo.

Con los criterios proporcionados en 4.2.2 podemos definir de manera más precisa las diferentes redes de uso industrial. Uno de los criterios más utilizados es el de los modelos de cooperación, con el cual por ejemplo clasificaríamos las redes MAP y PROFIBUS como modelo cliente / servidor; FIP como modelo productor(es) consumidor(es) y CAN como modelo productor consumidor(es).

4.3 Redes utilizadas a nivel de campo.

En el presente apartado analizamos y comparamos algunas de las redes más importantes, empleadas a nivel de campo, con el fin de evaluar sus prestaciones como redes de integración en el nivel donde se propone la presente tesis. Hemos considerado: HART, PROFIBUS, FIP, y CAN, por ser las más utilizadas en este tipo de entornos [Pint94].

Para complementar el análisis, en el apartado 4.4 presentamos dos de las redes que predominan en la interconexión de autómatas programables (PLCs)[Thom97]: la red *DataHighway* (DH+ de Allen Bradley), y la ModBus RT (de Modicon).

Antes de analizar las redes mencionadas, presentamos algunos puntos de interés general relativos a las mismas.

4.3.1 Introducción.

Hoy en día obtener un sistema de producción eficiente y rentable significa poder establecer mecanismos de supervisión y control que estén completamente integrados dentro de todo el sistema productivo. Por lo tanto la completa automatización de los procesos productivos o de fabricación, plantea la definición de sistemas de comunicación que posibiliten la interconexión de equipos industriales [DePl87][SoTh94][CaSi95].

Dentro de un sistema automatizado ideal, el nivel más alto puede ser interconectado con una red MAP a 10Mb/s, en banda ancha y multicanal. Su propósito es comunicar grandes paquetes de información de varios tipos, con canales para control, gráficos, vídeo, etc. A este nivel se usa el modelo completo de siete niveles OSI (Físico, Enlace, Red, Transporte, Sesión, Presentación, Aplicación). Estas redes se conectan con los niveles más bajos de la pirámide mediante unidades *gateways* – dispositivo inteligente que permite conectar de manera óptima buses de tipos y características completamente distintas -, donde también se usan redes MAP pero a menor velocidad, por ejemplo 5 Mb/s con un único canal para aplicaciones de tiempo real de alta velocidad. Estas redes se conocen como MiniMAP [VaCi90][Rome90][PaLe94] y son adecuadas para interconectar autómatas programables o controladores de procesos de varios lazos.

Cuando llegamos a estudiar la forma de interconectar el nivel más bajo de la jerarquía, nos encontramos que pueden haber cientos de elementos sencillos, conocidos como elementos de campo. A este nivel tratar de implantar una solución tipo MiniMAP resultaría muy costosa. El sistema de comunicación correspondiente para estos elementos se ha definido como bus de campo.

4.3.2 Definiciones de las distintas redes de campo.

Es necesario precisar que si el término bus de campo se aplica tal como lo describe el comité 50 de ISA - encargado de llevar adelante la estandarización de los sistemas de comunicaciones a este nivel -, muchas de las redes utilizadas en campo se quedan fuera de esta definición. Por consiguiente, para tener una visión completa de los buses utilizados en el área bajo estudio, es necesario definir también las otras redes utilizadas: redes de dispositivos y redes de sensores y actuadores. Seguidamente definimos brevemente cada una de ellas.

4.3.2.1 Buses de campo.

La definición más usual de un bus de campo especifica [HuLá89][RuDe94] que son redes de bajo coste, en tiempo real, de transmisión serie sobre un bus digital con capacidad para interconectar equipos (autómatas programables, controladores de proceso, sistemas de supervisión, etc.), con todo el espectro de dispositivos de campo (sensores, actuadores, terminales de captura de datos, pequeños autómatas, visualizadores, etc.).

Es necesario aclarar que según la definición dada por el comité 50 de la Sociedad de Instrumentación Americana (ISA) la definición de bus de campo - *fieldbus* - se limita a aquellas redes que pueden transferir más de 100 bytes de datos en una sola conexión.

4.3.2.2 Redes de dispositivos.

Estas redes, temporalmente posteriores a los buses de campo, están fuera del proceso de estandarización de ISA, ya que no cumplen con alguna(s) condición(es) del comité de estandarización, como por ejemplo el número de bytes de datos, o por que simplemente los fabricantes no desean adherirse al estándar, caso de LONwork.

Normalmente estos tipos de redes tienen un campo de datos limitado por algunos bytes. Por ejemplo CAN define un campo de datos de hasta 8 bytes.

4.3.2.3 Redes de sensores y actuadores.

Al igual que las anteriores este tipo de redes está fuera del estándar. A diferencia de las redes de dispositivos éstas permiten el intercambio, entre los nodos de la red, de sólo algunos bits.. Como el intercambio es muy breve y con pocos nodos esclavos, no existen las desventajas que presenta este tipo de intercambio en redes más grandes.

Como ejemplo podemos citar la red ASI (*Actuator Sensor Interface*) que maneja 4 bits por mensaje en una red tipo maestro / esclavo.

Casi todas estas redes son de tipo maestro / esclavo que implementan mecanismos de interrogación periódica

4.3.3 Ventajas de las redes de campo.

Se han realizado muchos estudios sobre los buses de campo y sobre las otras redes de este nivel [Deco85][DeP187][UIDe88][DeP193][UpDe96][CaSt96]. Estos buses vienen a sustituir a los sistemas de comunicación de campo tradicionales, como son los sistemas basados en conexiones punto a punto, sistemas basados en tecnología de señal analógica de lazo de corriente, etc.

La sustitución de los sistemas tradicionales es posible gracias al desarrollo de la tecnología VLSI que ha permitido implantar funciones de tratamiento y diagnóstico a los equipos periféricos industriales dotándolos de inteligencia y permitiéndoles soportar protocolos de comunicación para una red digital. Implantar redes digitales para conectar dispositivos de campo a una red digital permite obtener muchos beneficios y ventajas sobre las conexiones tradicionales. A continuación enumeramos las más importantes.

1. Mejora en la calidad y cantidad en el flujo de datos.

Se puede implantar sobre el mismo periférico funciones de tratamiento y acondicionamiento de la señal. Por ejemplo a los sensores analógicos se les puede dotar de convertidor A/D: en lugar de proporcionar una señal analógica débil y difícil de transportar envían una señal digital con el valor exacto de la medida y con menor riesgo de interferencias del medio.

Mediante protocolos adecuados es posible conectar a la misma red digital varios dispositivos periféricos y, al mismo tiempo, si es necesario, permitir el intercambio bidireccional de información entre ellos, facilitando de esta manera la implantación de redes de control distribuido.

2. Ahorro en los costes de cableado e instalación.

Gracias a la posibilidad de implementar protocolos para la atención de varios periféricos conectados a los mismos cables, el cableado se reduce mucho pues, a diferencia de una conexión punto a punto, sobre el mismo par de cables se encuentran conectados más de un dispositivo, haciendo que los costes y la dificultad de las conexiones se reduzcan notablemente.

3. Facilidad de ampliación o reducción del número de elementos conectados.

Esta es una ventaja muy grande de los sistemas con conexión digital de periféricos, pues añadir uno a más elementos no significa un aumento de cableado significativo. Además casi todas las redes de campo permiten la conexión y desconexión de nodos bajo tensión.

4. Reducción de errores de instalación.

El tener menos cableado reduce significativamente las posibilidades de errores de instalación, por ser más fácil la verificación. Por el contrario en los sistemas convencionales los tableros de paso están llenos de mazos de cables que hacen que su verificación sea lenta y difícil.

5. Incremento de la eficiencia.

Al poder implementarse, dentro de los dispositivos periféricos, funciones de mantenimiento, control y diagnóstico, pueden comunicar situaciones anormales de funcionamiento o requerimientos de calibración manual, con lo que se incrementa la eficiencia y disminuyen las operaciones de mantenimiento.

4.3.4 Redes de campo más importantes.

4.3.4.1 HART.

4.3.4.1.1 Características principales.

HART (*Highway Addressable Remote Transducer*) ha sido el primer bus empleado en campo. Fue desarrollado por Rosemount a mediados de los años 80, al tiempo que fueron apareciendo los llamados dispositivos inteligentes de campo (*smart devices*), los cuales estaban basados en sistemas con microprocesador.

Este protocolo permite transmitir datos digitales, superpuestos a una señal convencional de 4 – 20 mA, sin perturbar a la señal analógica presente, tal como muestra la Figura 29 (a). Esto permite comunicarse digitalmente para fines de configuración, diagnóstico o planificación. De esta manera HART presenta algunas características de un bus de campo, pero mantiene totalmente las características de las estrategias de control convencionales.

La Figura 29 (b) muestra un esquema de conexión de tres transmisores inteligentes en paralelo a un único par de cables. En este ejemplo cada dispositivo transmite cuando se le pide (en la figura se indica el consumo del sistema cuando ningún elemento transmite $3 \times 4mA = 12mA$).

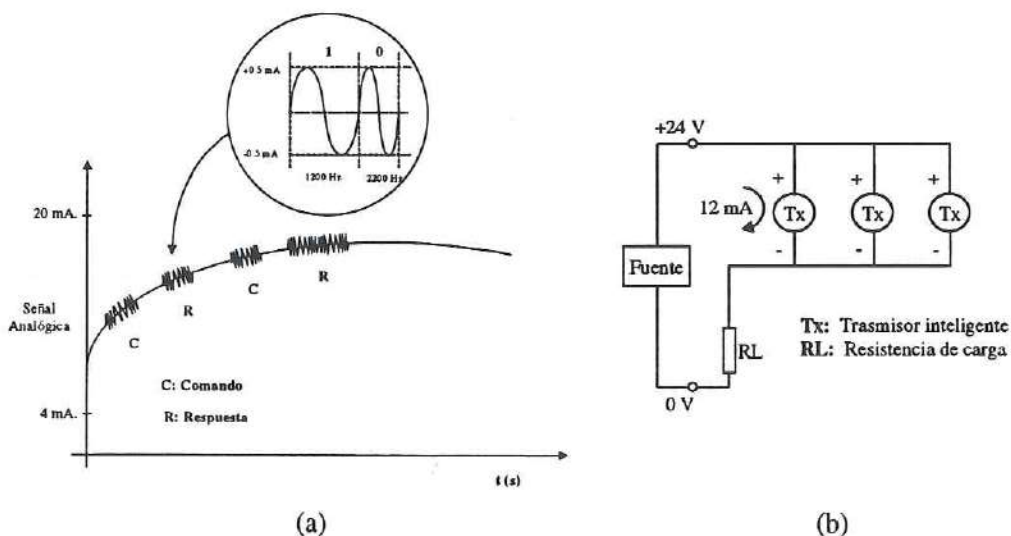


Figura 29: Señales HART.

Las principales características de este bus [Bowd96], se indican en la Tabla 8.

Nombre del bus		HART
Velocidad		1.2 kb/s
Número máximo de nodos	con repetidores	No acepta repetidores
	sin repetidores	15
Topología		Bus (a árbol)
Tipo de red		Maestro / esclavo
Tamaño máximo de datos en bytes		25
Longitud máxima del bus	con repetidores	No acepta repetidores
	sin repetidores	2000 m (con un solo elemento de campo)
Normas		Sólo las de HART Communication Foundation
Tipos de aplicación		Redes de sensores y actuadores
Característica principal		Coexistencia con sistemas convencionales de control

Tabla 8: Características principales de HART.

4.3.4.1.2 Protocolo y formato de tramas.

HART es un protocolo maestro / esclavo donde los elementos de campo sólo responden cuando se les pregunta.

El formato de las tramas es el mostrado en la Figura 30.

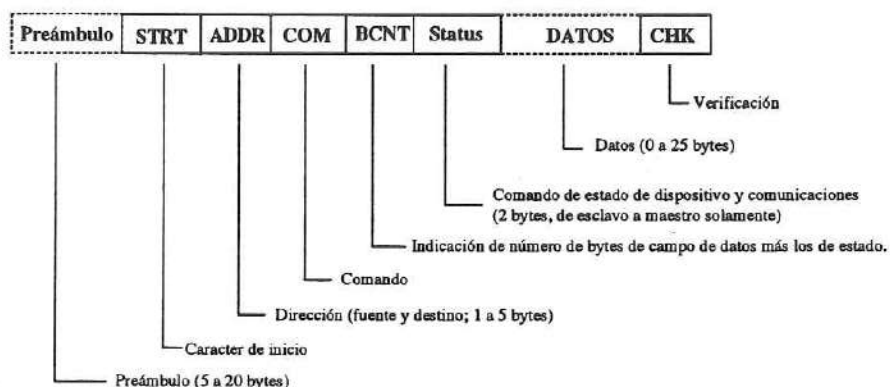


Figura 30: Estructura de un mensaje HART.

4.3.4.2 PROFIBUS.

4.3.4.2.1 Características principales.

PROFIBUS (*Process Field Bus*) nació como un proyecto conjunto financiado por el ministerio federal de investigación y tecnología de Alemania, en el que participaron 18 empresas alemanas para desarrollar y probar un nuevo bus digital para instrumentos y dispositivos de control en el nivel más bajo de la jerarquía de automatización. El trabajo realizado entre 1987 y 1991 quedó registrado en el estándar alemán DIN19245, en el que se especifica el juego de protocolos Profibus.

Nombre del bus		PROFIBUS
Velocidad		9.6 kb/s a 0.5 Mb/s
Número máximo de nodos	con repetidores	127
	sin repetidores	32
Topología		Bus (en árbol)
Tipo de red		Híbrida entre paso de testigo y maestro /esclavo
Tamaño máximo de datos en bytes		250
Longitud máxima del bus	con repetidores	800 m
	sin repetidores	200 m
Normas		DIN19245
Tipos de aplicación		Automatización de fábricas e intercomunicación entre PLCs
Característica principal		Servicios de mensajería notables

Tabla 9: Características principales de PROFIBUS.

4.3.4.2.2 Protocolo y formatos de tramas.

La arquitectura de los dos protocolos PROFIBUS (DP y FMS) está basada en el modelo ISO 7498. Existen tres variaciones principales de PROFIBUS de acuerdo a la aplicación deseada:

PROFIBUS-FMS: Ésta es la solución universal para la tarea de comunicación en el nivel superior (nivel de célula) y en el nivel de campo de la jerarquía de la comunicación industrial. Para cumplir con la extensa tarea de los sistemas de comunicación a este nivel, con transferencias de datos cíclicos o acíclicos, la Especificación del Mensaje de Bus de campo (FMS *Fieldbus Message Specification*) ofrece servicios con una gama amplia de funcionalidad y flexibilidad. PROFIBUS-FMS se incluye en el estándar europeo de bus de campo EN 50170.

PROFIBUS-DP: Esta variación es la versión optimizada de PROFIBUS específicamente especializada en comunicaciones de tiempo-crítico entre sistemas de automatización y periféricos distribuidos. Éste es un reemplazo satisfactorio para las costosas instalaciones eléctricas paralelas de 24 V y 4 (0) a 20 mA. PROFIBUS-DP se incluye en el estándar europeo de bus de campo EN 50170.

PROFIBUS-PA: Esta variación se presenta como solución orientada a la automatización de procesos. PA conecta sistemas de automatización y aparatos de campo descentralizados. El perfil o variación PA define los comportamientos de los elementos de campo y asegura la total interoperabilidad e intercambiabilidad de los dispositivos de campo de fabricantes diferentes.

La arquitectura del protocolo PROFIBUS-FMS y PROFIBUS-DP se muestra en la Figura 31. Ambas variaciones usan el mismo protocolo de acceso al medio (Capa 2) y la misma técnica de transmisión (Capa 1).

En PROFIBUS-FMS las Capas 3 a 6 no están definidas. Las funciones de estas Capas, necesarias para la aplicación específica, se combinan en la Interfaz de las Capas Bajas (*LLI Low Layer Interface*), que forma parte de la Capa 7. La Especificación del Mensaje de bus de campo (FMS *Fieldbus Message Specification*) contiene el protocolo de la aplicación y ofrece

una variedad de servicios de comunicación. FMS proporciona la interfaz de usuario. Los servicios FMS se definen como un subconjunto de las funciones MMS (ISO 9506) del protocolo MAP. Las funciones complejas de MMS se optimizan dependiendo de los requisitos del bus de campo. Adicionalmente, se definen funciones específicas del bus de campo para la administración de objetos de comunicación y manejo de la red.

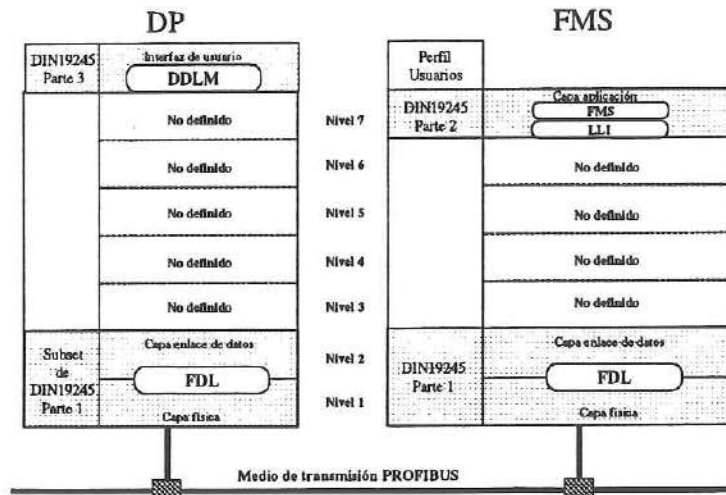


Figura 31: Arquitectura de los protocolos PROFIBUS.

En PROFIBUS-DP las capas de la 3 a la 7 no se utilizan. La Capa de Aplicación (7) se omite para lograr las prestaciones requeridas. El Mapeador de Enlaces de Datos (**DDL** *Direct Data Link Mapper*) proporciona las funciones de la capa 2 para la interfaz de Usuario.

Ambas variantes de PROFIBUS definen en el nivel 2 el Enlace de Datos (**FDL** *Fieldbus Data Link*), que define la forma híbrida de acceso al medio mostrada en la Figura 32. Esta forma de acceder al medio incluye el método de paso de testigo para la comunicación entre maestros y el método maestro / esclavo para la comunicación entre las estaciones maestras y sus periféricos.

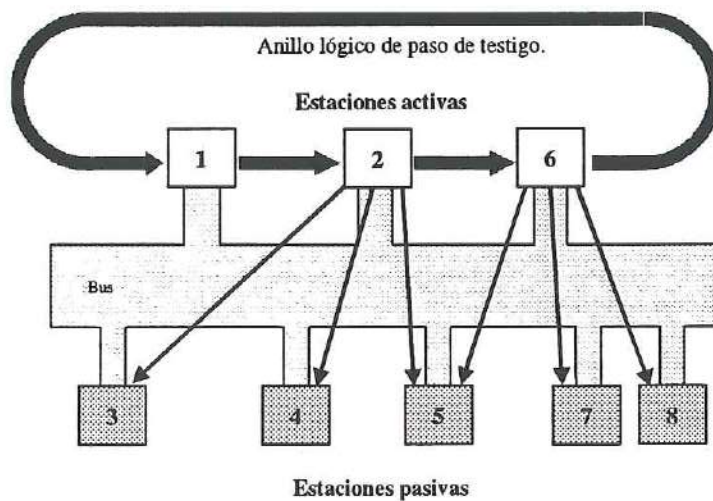


Figura 32: Control de acceso a la red PROFIBUS.

El método de paso de testigo asegura, por medio del testigo, la asignación del derecho al acceso al bus dentro de un intervalo preciso de tiempo. Los dispositivos que acceden al bus se llaman estaciones activas. El método maestro / esclavo, se emplea por las estaciones activas, cuando tienen el testigo, para comunicarse con sus elementos esclavos, llamados estaciones pasivas.

En la Figura 33 se muestra los formatos de las tramas en un bus PROFIBUS.

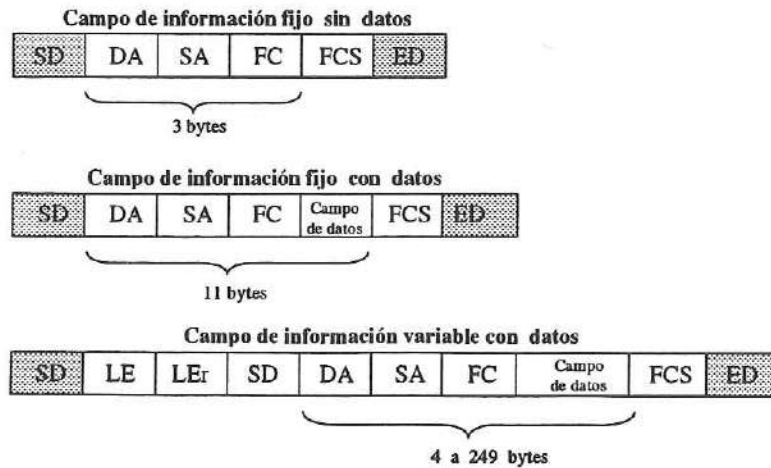


Figura 33: Formato de tramas en PROFIBUS

El primer tipo de trama no contiene datos y es de longitud fija, sirve para intercambiar señales de control entre los nodos. El segundo tipo con longitud fija de datos, es el utilizado para transmitir los mensajes con restricciones de tiempo. El tercer tipo es el utilizado para todos los servicios de mensaje sin restricciones y tiene longitud variable.

Todas las tramas comienzan con un byte de inicio (SD) y terminan con un byte de verificación (FCS) y uno de fin de trama (ED). Se incluye también las direcciones del nodo de origen (SA) y destino (DA) del mensaje, así como un byte para control de la trama (FC). Opcionalmente las tramas pueden contener un campo de datos, fijo a variable de acuerdo al tipo de mensaje. Las tramas con longitud de datos variable incluyen también dos bytes (LE y LEr) para indicarla.

4.3.4.3 WorldFIP.

4.3.4.3.1 Características principales.

FIP (*Flux Information Processus*) nació en 1985, bajo la coordinación del Ministerio de Investigación Francés. Se publicó un documento describiendo una visión de las necesidades futuras de interconexión de dispositivos en planta tanto de procesos continuos como discretos. Ésta fue la base sobre la que se desarrolló el protocolo FIP. El resultado de dichos trabajos adoptó la forma de estándar francés quedando registrado en las normas NF C-46-601/2/3/4/5, y posteriormente en la especificación europea para bus de campo EN50170.

Las características principales de este bus se muestran en la Tabla 10.

Nombre del bus		WorldFIP
Velocidad		31.25 kb/s a 2.5 Mb/s
Número máximo de nodos	con repetidores	256
	sin repetidores	64
Topología		Bus (en árbol)
Tipo de red		Maestro / esclavo
Tamaño máximo de datos en bytes		128
Longitud máxima del bus	con repetidores	> 10 km
	sin repetidores	2 km
Normas		EN50170
Tipos de aplicación		Control de procesos en tiempo real
Característica principal		Base de datos distribuida

Tabla 10: Características principales de WorldFIP.

4.3.4.3.2 Protocolo y formato de tramas.

Este bus utiliza acceso a la red tipo maestro / esclavo. Los tipos de transferencia que soporta son:

- **Variables cíclicas:** Siempre se transmiten, y se emplean para operaciones con tiempos críticos.
- **Variables eventuales:** Son las que se transmiten sólo bajo demanda o por cambio de estado, por ejemplo alarmas u operaciones de visualización.
- **Mensajes:** Éstos no tienen ninguna restricción de tiempo, por ejemplo datos para mantenimiento o diagnóstico.

La red FIP puede ser comparada con una tubería, donde existe un espacio reservado para las variables cíclicas, que no puede ser ocupado por los otros tipos de variables. Las variables que no tienen restricción de tiempos sólo pueden utilizar el ancho de banda que queda disponible en el bus. La Figura 34 muestra gráficamente esta analogía y la Figura 35 la arquitectura del protocolo FIP.

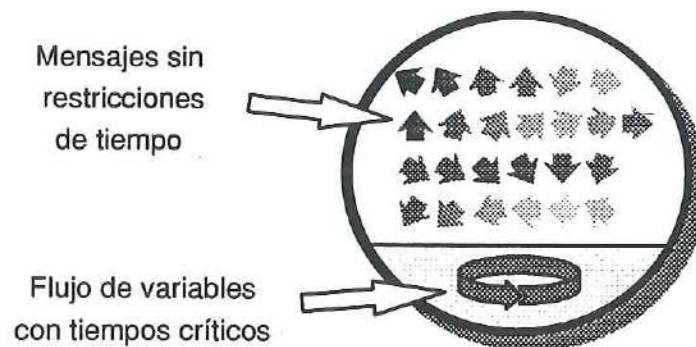


Figura 34: Distribución de ancho de banda en WorldFIP.

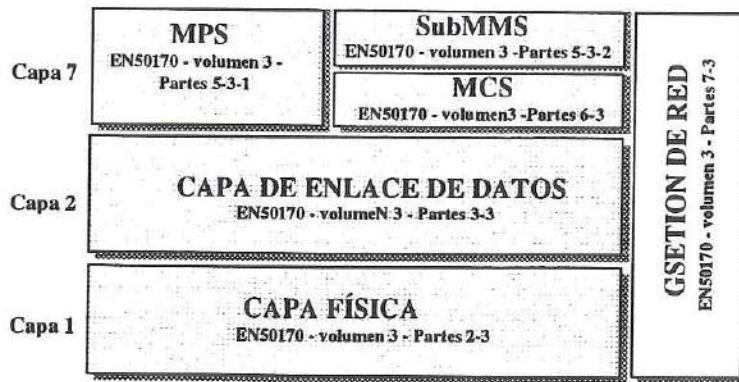


Figura 35: Arquitectura del protocolo WorldFIP.

En la Figura 36 se muestra la forma de realizar una transacción en una red FIP, y los formatos de tramas.

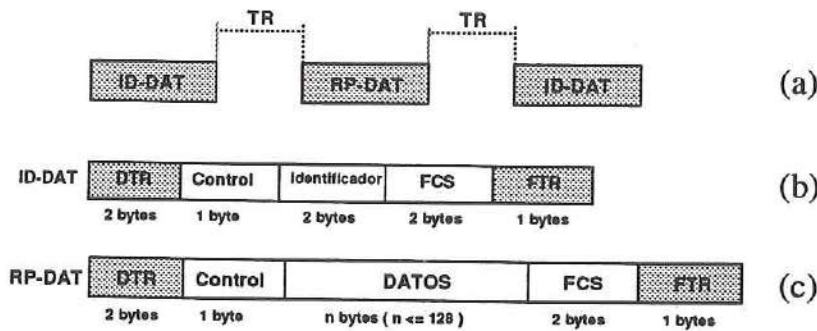


Figura 36: Formato de tramas en WorldFIP.

Todas las transacciones son realizadas según el mecanismo indicado en la figura (a), se inician con una trama de pregunta (ID) seguida por la respuesta correspondiente (RP). En (b) y (c) de la Figura 36 se presentan un ejemplo, de trama de pregunta y respuesta respectivamente. Todas las tramas están limitadas por dos bytes de inicio (*DTR Début de Trame*) y uno de fin de trama (*FTR Fin de Trame*). Además cada trama lleva un campo de verificación de secuencia de trama de 2 bytes (*FCS Frame Check Sequence*), y un campo de control de 1 byte.

4.3.4.4 P-NET.

4.3.4.4.1 Características principales.

P-NET (*Process automation NET*) fue diseñado en 1983, y los primeros productos, con este estándar, fueron lanzados al mercado en 1984.

Este estándar, al igual que PROFIBUS y FIP, nació como estándar nacional (en este caso danés), y desde 1989 es un sistema abierto. También ha sido propuesto, junto con los dos antes mencionados, para servir de base al estándar europeo para buses de campo.

Nombre del bus		P-NET
Velocidad		76.8 kb/s (300 mensajes por segundo)
Número máximo de nodos	con repetidores	No se utilizan
	sin repetidores	125
Topología		Bus (en árbol)
Tipo de red		Multi maestro (hasta 32 por segmento)
Tamaño máximo de datos en bytes		56
Longitud máxima del bus	con repetidores	No se utilizan
	sin repetidores	1200 m
Normas		---
Tipos de aplicación		Procesos industriales
Característica principal		Velocidad fija

Tabla 11: Características principales de P-NET.

4.3.4.4.2 Protocolo.

Normalmente, los buses de campo están especificados sólo en tres niveles (1, 2 y 7), pero dado que con P-NET se pueden implantar estructuras tipo multired, es necesario definir también los niveles 3 y 4 del modelo. Por consiguiente P-NET está diseñada de acuerdo a los niveles 1, 2, 3, 4 y 7 del modelo de referencia OSI.

Una de las características más notables de P-NET es el uso de un mecanismo, llamado "Testigo Virtual", para controlar el acceso de los maestros a la red. Para implantarlo todos los maestros tienen un contador de tiempo de bus libre, el cual se incrementa cada periodo igual al tiempo de un bit - éste es el tiempo que se tarda en enviar un bit físicamente a la red -, pero se pone a cero cada vez que el bus se vuelve activo. Cada maestro tiene también un contador de acceso, el cuál se incrementa cada vez que el contador de periodos libres de ciclos de bus alcanza en su cuenta 40, 50, 60, etc.

Cuando el contador de acceso en un maestro es igual a su dirección de nodo, el maestro retiene el testigo, y tiene permiso para acceder al bus. Cuando los contadores de accesos exceden el número máximo de maestros, se reinician a 1.

La Figura 37 muestra un ejemplo de este mecanismo de testigo virtual, para una red configurada con 4 maestros.

En este ejemplo, al inicio de la secuencia el maestro número 3 tiene el testigo, y está recibiendo por el bus una respuesta de un esclavo. Luego de terminada la recepción el bus queda libre.

Una vez libre el bus, los nodos cuentan hasta cuarenta tiempos de bit y sus contadores de acceso se incrementan en uno. En este punto es el maestro 4 el que tiene derecho al acceso. Si el nodo 4 no tiene nada que transmitir, como el del ejemplo de la Figura 37, el bus seguirá inactivo un número de ciclos. Después de que se alcance la cuenta 50, es el nodo 1 el que tiene este derecho.

Si el maestro 1 tampoco necesita transmitir (y puede darse el caso que ni siquiera esté presente), el testigo pasa al maestro 2, cuando el contador alcanza en su cuenta 60.

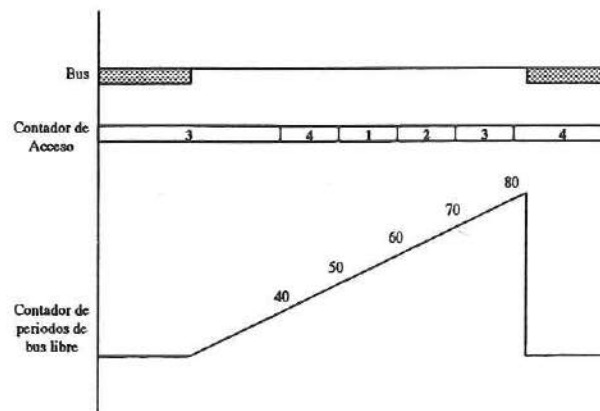


Figura 37: Paso de testigo virtual en una red P-NET.

En el ejemplo, se ha supuesto que los maestros 2 y 3 tampoco tienen nada que transmitir, por lo que el testigo pasa, cuando el contador sea igual a 80, al maestro 4 que se queda con él, pudiendo entonces empezar a transmitir.

4.3.4.5 CAN.

4.3.4.5.1 Características principales.

CAN (*Control Area Network*) ha sido desarrollado, entre 1983 – 1985, por la firma alemana Bosch en colaboración con INTEL para ser empleado en el sector automovilístico. El objetivo principal era el de reducir drásticamente el cableado eléctrico dentro de los vehículos aumentando al mismo tiempo la flexibilidad de configuración y la seguridad del transporte de la información.

En el año 1987, CAN fue lanzado al mercado y era el único sistema abierto de comunicaciones para automóviles. Gracias a sus prestaciones CAN fue exportado a los entornos industriales, donde ha demostrado que es un sistema de interés y fiable.

La gran difusión de CAN se puede atribuir a la existencia de un gran número de circuitos integrados que realizan completamente la funcionalidad de CAN. Actualmente los principales productores de procesadores (INTEL, MOTOROLA, etc.) fabrican circuitos integrados con esta funcionalidad. Uno de los respaldos más grandes que ha tenido CAN le ha sido dada por uno de los fabricantes más importantes de autómatas - Allen Bradley -, quien lo ha adoptado para los sistemas de comunicación entre dispositivos de campo, en su red Device Net.

Antes de enumerar las características principales de CAN, es necesario aclarar algunos términos que se emplean al especificarlo.

Se distinguen dos versiones del estándar, la versión V2.0A, conocida como CAN estándar, y la versión V2.0B conocida como CAN extendido. La diferencia entre las dos versiones, es el tamaño del identificador utilizado, 11 y 29 bits respectivamente. Normalmente los chips que implementan la versión extendida también manejan la versión estándar. En una red pueden coexistir ambos tipos.

Otros términos a diferenciar, que indican el modo en que el estándar CAN está implementado dentro del chip, son (con la versión estándar):

SLIO-CAN (Serial Linked I/O chip): estos elementos disponen de un buffer de transmisión y un buffer de recepción doble (este buffer es doble para permitir recibir dos mensajes, uno tras otro, sin perderlos). El dato de entrada cuenta con una máscara de filtrado, que limita el número de mensajes que el nodo puede detectar, disminuyendo el tiempo que el nodo dedica a procesar mensajes que no le corresponden. En este tipo de elementos los mensajes son convertidos directamente en señales de entrada o salida, analógicas o digitales, según la configuración del mismo. Estos dispositivos no tienen una CPU que los gestiona siendo su costo bastante reducido.

CAN básico (Basic-CAN): estos elementos ofrecen una interfaz hacia un microcontrolador, o microprocesador, externo o integrado que se encargará de procesar los mensajes recibidos, y de generar los que deben ser enviados. Al igual que antes también cuenta con la máscara de filtrado de datos de entrada.

CAN completo (Full-CAN): en estos dispositivos están disponibles 14 buffers, configurables libremente para transmisión o recepción de mensajes. Con esto se logra una mayor flexibilidad, a la hora de realizar el software de gestión de las comunicaciones, pues no es necesario esperar a transmitir una trama para enviar la siguiente.

CAN versión extendida: en esta versión se utilizan, a parte de los 14 mensajes configurables de la anterior, un mensaje dedicado a la recepción - el número 15 -, que tiene un buffer doble para no perder datos de ingreso. También tiene, además de la máscara de filtro principal, una segunda máscara para el mensaje de recepción. En la Figura 38 se muestran los diferentes tipos de interfaces que se pueden obtener con CAN.

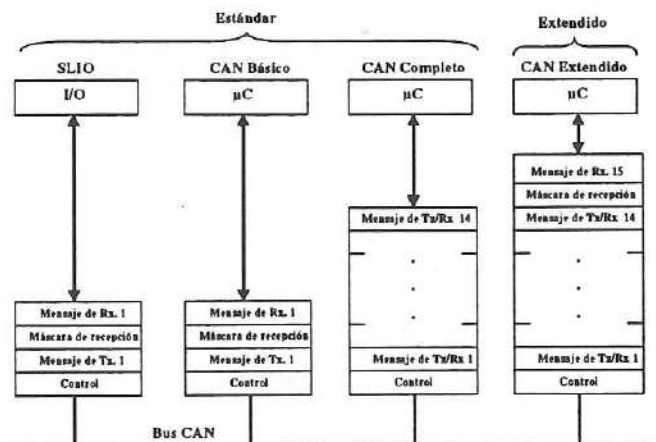


Figura 38: Posibles variantes de interfaces con CAN.

Las características principales de CAN están indicadas en la Tabla 12.

Nombre del bus		CAN
Velocidad		hasta 1 Mb/s
Número máximo de nodos	con repetidores	No acepta repetidores
	sin repetidores	32 a 64 (depende del <i>transceiver</i>)
Topología		Bus (en árbol)
Tipo de red		Multimaestro
Tamaño máximo de datos en bytes		128
Longitud máxima del bus	con repetidores	> 10 km
	sin repetidores	2 km
Normas		ISO11519-1,2, ISO11898
Tipos de aplicación		Redes de dispositivos, automóviles
Característica principal		Bajo coste muy eficiente para mensajes cortos

Tabla 12: Características principales de CAN.

4.3.4.5.2 Protocolo y formato de tramas.

CAN sólo está normalizado, comparándolo con el modelo de referencia OSI, en las dos primeras capas, la capa física y la capa de enlace. Para la capa 7 – capa de aplicación –, existen varias alternativas entre las más conocidas: DeviceNet (de Allen Bradley) y SDS (de Honeywell).

En los chips actualmente disponibles, se implementan completamente los niveles 1 y 2, aunque el *transceiver*, para realizar la conexión física a la red, debe ser conectado externamente. Lógicamente los SLIO tienen integrado también el nivel 7 pues la funcionalidad en este caso es mínima. En todos los otros casos, el nivel 7 es realizado por el software.

Los niveles 1 y 2 pueden ser subdivididos posteriormente en otros niveles, tal como se muestra en la Figura 39.

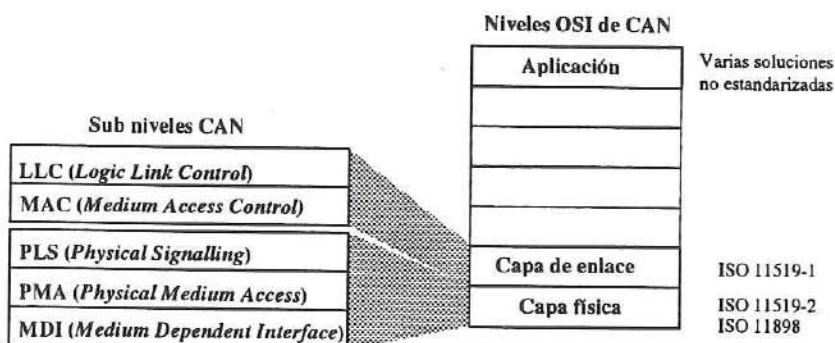


Figura 39: Niveles de CAN estandarizados.

Respecto a las tramas de datos éstas pueden contener hasta 8 bytes, menos las de petición remota que no llevan ningún dato. En la Figura 40 se muestra la trama completa, para versión de identificador estándar y extendido, de un mensaje de datos.

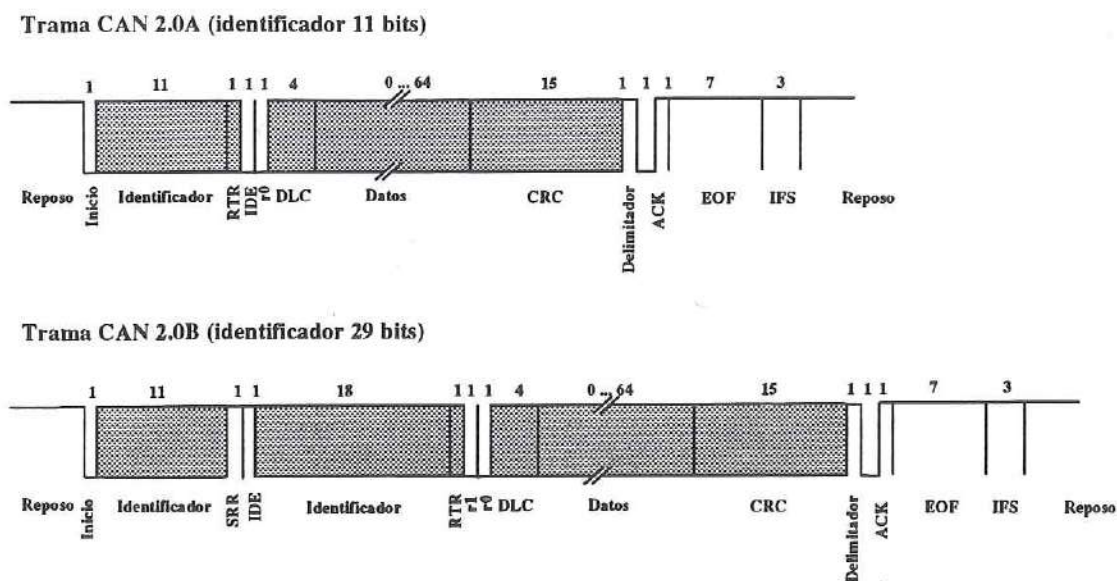


Figura 40: Tramas para identificador estándar y extendido.

Las principales características de los campos indicados en la Figura 40 se muestran en la Tabla 13.

Campo		Longitud	Comentario
Inicio		1 bit	Siempre dominante
Identificador		11 bits (estándar) 29 bits (extendido)	
RTR (Remote Transmission Request)		1 bit	Dominante en la trama de respuesta
Control	IDE (Identifier Extension)	1 bit	Dominante para la versión estándar
	r0, r1	1 bit cada uno	Reservados usos futuros
	DLC (Data Length Code)	4 bits	Indica longitud en bytes del campo de datos
Datos		0 a 8 bytes	
CRC (Cyclic Redundancy Check)		15 bits	Verificación de consistencia y errores de trama
ACK		2 bits	Recesivos al envío de la trama. Todas las estaciones presentes en la red sobrescriben un bit dominante en el primer bit
EOF (End Of Frame)		7 bits	Recesivos
IFS (Interframe Space)		3 bits	Para garantizar tiempo de proceso en receptor
Reposo			Cuando ninguna estación transmite

Tabla 13: Características de los campos de una trama CAN.

4.3.4.6 Discusión del análisis de las redes de campo.

1. Cuando el sistema automatizado no alcanza el nivel de magnitud suficiente para justificar una implantación completa según CIM, se procede muchas veces a extender la red informática del nivel superior, como por ejemplo el protocolo TCP/IP sobre ETHERNET, conectada a ordenadores industriales que desarrollan el papel de *gateway* hacia los niveles inferiores. Si este es el caso, es aconsejable separar el segmento de red utilizado en las

oficinas, de aquellos de los ambientes de planta mediante un *bridge*, para separar y hacer independientes los tráficos de ambas áreas.

2. En los casos en que se extienda el campo de utilización de un bus de sensores al nivel superior, por ejemplo para interconectar dos máquinas con cierta capacidad de proceso, hay que tener en cuenta que las prestaciones del sistema podrían disminuir – ya que la cantidad de datos a intercambiar será mayor –, originando retardos de tiempo más grandes que los obtenidos en las aplicaciones con pocos bytes de datos.
3. Se emplean buses de campo en una variedad de sectores para los cuales unos son más aptos que otros, de acuerdo a la aplicación específica. Podemos decir, al igual que de cualquier otro tipo de bus, que cada uno tiene un campo de aplicación donde sus prestaciones son mejores que las de los otros. Es difícil establecer que exista uno que pueda ser empleado en todos los niveles de la pirámide de automatización CIM.
4. CAN ha demostrado en los últimos años que es fiable y poco costoso. Además existen en el mercado una gama de controladores y circuitos integrados con capacidad de implementarlo. Es completamente determinista y muchos fabricantes de relevancia, en el mundo de la automatización, lo emplean como bus en los niveles inferiores de los sistemas de comunicación industrial.
5. Como desventaja de CAN se puede decir que presenta limitación respecto a la longitud y velocidad de funcionamiento. Puesto que cada nodo debe escuchar al bus antes de transmitir, la longitud de cada bit debe ser al menos el doble del retardo de propagación. Por lo tanto las altas velocidades sólo son soportadas en buses cortos. La transmisión de mensajes de más de ocho bits origina la necesidad de tener un algoritmo que permita la fragmentación en el nodo de origen, para permitir enviar el mensaje en paquetes de ocho bits, y la reconstrucción en el nodo de recepción.

4.4 Redes de autómatas programables (PLCs).

4.4.1 Introducción.

Para realizar un análisis completo de las redes utilizadas en los entornos industriales, es necesario también considerar una serie de redes industriales propuestas por diversos fabricantes, generalmente para interconectar autómatas programables, como por ejemplo las indicadas en la Tabla 14.

Fabricante	Red	Estándar	Número de nodos	Tipo de red
Toshiba	Tosline-30	RS-485	30	Maestro / esclavo
Siemens	PPI	RS-485	31	Paso de testigo
Modicon	Modbus RT	RS-485	246	Maestro / esclavo
Allen Bradley	DH	RS-485	255	Paso de testigo

Tabla 14: Ejemplo de redes de autómatas.

Si bien estas redes han nacido como redes propietarias, gracias a la tendencia de los sistemas abiertos, algunas de ellas hoy se encuentran muy difundidas en los entornos automatizados. Lógicamente cada una tiene características muy particulares, definidas para cubrir las necesidades de intercomunicación entre los elementos que las soportan. Estas redes han sido diseñadas para cumplir las rigurosas exigencias de las aplicaciones industriales. En los apartados 4.4.2 y 4.4.3 presentamos una descripción más detallada de dos de las principales redes de este tipo.

4.4.2 DataHighway (DH).

Esta red permite operar en modo par a par, utilizando un acceso con paso de testigo modificado llamado "maestro flotante". Esta forma de acceso proporciona un esquema para los nodos que necesiten tener acceso al bus, en base a su prioridad y necesidades. Las características más importantes de esta red se indican en la Tabla 15.

Nombre del bus	DH
Velocidad	57.6 kb/s
Número máximo de nodos	255
Topología	Bus
Tipo de red	Par a par
Longitud máxima del bus	3048 m
Tipos de aplicación	Fabricación discreta
Característica principal	Interconexión de autómatas

Tabla 15: Características principales de la red DH.

Existen dos variantes de este tipo de red:

- La red DH+ que permite conectar hasta 64 PLCs de las series 2, 3 y 5 en conexión de procesador a procesador, mediante una tarjeta de interfaz y software apropiado.
- La red DH485 que utiliza el estándar RS-485 y permite la operación de hasta 32 nodos a una velocidad de 115 kb/s.

4.4.3 Modbus RT.

Esta red es utilizada por Modicom para intercomunicar autómatas. Es también utilizada por otros fabricantes que añaden a su hardware, una unidad terminal remota (RTU *Remote Terminal Unit*) que opera bajo Modbus RT.

Esta red no es una red de dispositivos de campo, pues sólo permite la interconexión entre procesadores bajo el esquema un maestro y uno o más esclavos. Las principales características de esta red están indicadas en la Tabla 16.

Nombre	Modbus RT
Velocidad	19.2 kb/s
Número máximo de direcciones	246
Topología	Bus
Tipo de red	Maestro / esclavo
Longitud máxima del bus	12192 m
Tipos de aplicación	Fabricación discreta
Característica principal	Interconexión de autómatas

Tabla 16: Características principales de la red Modbus RT.

4.4.4 Discusión de las redes de autómatas.

Si bien existen algunos protocolos para intercomunicar autómatas que se han definido como abiertos, son pocos los fabricantes de autómatas, de medias y bajas prestaciones que los utilizan. Generalmente cada uno define sus propios estándares en función del área y las necesidades que pretenden cubrir. Por consiguiente es poco probable encontrar, dentro de un sistema o planta específica, que todos los autómatas tengan definido el mismo tipo de bus de conexión.

Además en muchos casos, los PLCs del mismo fabricante no soportan los sistemas de comunicación definidos para un tipo de familia determinado.

Por todo ello la integración de autómatas en las comunicaciones industriales se ha de basar en la introducción de sistemas de interfaz para su incorporación a redes de campo.

4.5 Conclusiones.

En los capítulos 2, 3, y 4 se ha presentado una revisión del estado de las técnicas de integración de dispositivos de campo mediante redes industriales de comunicaciones. El estudio ha puesto de manifiesto las características, ventajas e inconvenientes de los diferentes estándares y soluciones "de facto" en uso. La dificultad de integrar los dispositivos de los niveles bajos de la pirámide CIM constituye un problema de importancia creciente y todavía abierto, cuya solución está motivando nuevos proyectos de investigación y la aparición de propuestas metodológicas concretas.

En los capítulos 5 y 6 siguientes de la presente memoria, se expone el desarrollo principal de esta tesis con la aportación de una nueva metodología para la integración de los sistemas de comunicaciones de campo, su implementación experimental en un sistema industrial de demostración, y el estudio de validación correspondiente basado en la medida de prestaciones del sistema, y en la delimitación del alcance potencial del método propuesto.