

03063  
4  
29



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**UNIDAD ACADÉMICA DE LOS CICLOS PROFESIONAL Y POSGRADO DEL COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATEMÁTICAS APLICADAS Y EN SISTEMAS**

**ARQUITECTURA DE UNA RED DE COMUNICACIONES DE UN SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO PARA CENTRALES TERMOELECTRICAS**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACION**

**P R E S E N T A :**

**LUIS GARCIA GUTIERREZ**

México, D. F.

19 de Septiembre de 1989

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**UNIDAD PROFESIONAL Y CICLOS DE POSGRADO  
COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATEMATICAS  
APLICADAS Y SISTEMAS**

**MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACION**

**PROPUESTA DE TESIS**

**"Arquitectura de una red de comunicaciones  
de un sistema de control distribuido  
para Centrales Termoeléctricas"**

**LUGAR DE DESARROLLO**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS**

**AUTOR**

**ING. Luis García Gutiérrez**

**ASESOR IIE**

**Dr. Alejandro Villavicencio Ramírez**

**DIRECTOR DE TESIS IIMAS**

**M.C. Francisco J. Santoyo Vásquez**

**Noviembre de 1989**

# Contenido

<b>1 INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo	2
1.2 Alcance	2
1.3 Contribución	3
1.4 Contenido de la Tesis	4
1.5 Resumen	5
<b>2 SISTEMAS DISTRIBUIDOS</b>	<b>6</b>
2.1 Sistemas de Procesamiento Distribuido	6
2.1.1 Tiempo Real	7
2.1.2 Problemas en el Diseño de Sistemas Distribuidos	8
2.2 Estructura y Composición de Sistemas Distribuidos	11
2.2.1 Primitivas de Comunicación	14
2.3 Arquitectura y Protocolos	17
2.3.1 Modelo OSI	17
2.3.2 Protocolos de Redes Locales	20
2.3.3 Protocolos para Redes Industriales	25
<b>3 SISTEMAS DE CONTROL DISTRIBUIDO</b>	<b>26</b>
3.1 Introducción A SDCD	28
3.1.1 Generalidades	28
3.1.2 Control Distribuido Jerárquico	31
3.1.3 Instrumentación y Control de Centrales Termoelectricas	32
3.2 Usuarios del SDCD	34
3.3 Tareas Principales	35
<b>4 ESPECIFICACION DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES</b>	<b>36</b>
4.1 Requerimientos de Transferencia de Información	36
4.1.1 Tipos de Mensajes	38
4.1.2 Cantidades de Información	40
4.1.3 Flujos de Información	40
4.1.4 Nombres y Direcciones	40
4.1.5 Tiempos de Respuesta	41
4.1.6 Disponibilidad	41
4.1.7 Integridad de Información	42
4.1.8 Reconfigurabilidad	43
4.1.9 Resumen de Requerimientos	43

4.2	Especificaciones de Comunicaciones para el SDCD	44
4.2.1	Introducción	44
4.2.2	Objetivo	44
4.2.3	Definiciones	44
4.2.4	Descripción General	46
<b>5</b>	<b>ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES</b>	<b>49</b>
5.1	Descripción del Equipo	49
5.1.1	Unidades de Control de Proceso (UCP)	50
5.1.2	Unidades de Interfaz de Operación (UIO)	50
5.1.3	Unidades de Interfaz de Supervisión (UIS)	52
5.1.4	Controladores de Comunicaciones	52
5.1.5	Configuración del Equipo	53
5.2	Organización de la Base de Datos	55
5.3	Capas del Protocolo de Comunicaciones	56
5.3.1	Conceptos Generales	56
5.4	Capa de Aplicación	57
5.5	Capa de Transporte en Tiempo Real	58
5.5.1	Tipos de Transacciones del SDCD	58
5.5.2	Primitivas propuestas para el SDCD	62
5.5.3	Monitoreo de Red	66
5.6	Capa de Enlace	67
5.7	Capa Física	68
<b>6</b>	<b>EVALUACION</b>	<b>69</b>
6.1	Utilización	69
6.2	Tiempo de Respuesta de la Red	73
6.3	Disponibilidad	76
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>78</b>

## Lista de Tablas

2.1	Tiempos de Respuesta para Diferentes Industrias . . . . .	7
2.2	Estructura de una Estación de un S.D . . . . .	11
2.3	Estructura Independiente del S.O y del S. de C. . . . .	13
2.4	Capas del Modelo OSI . . . . .	18
2.5	Ejemplo de Aplicación del Modelo OSI . . . . .	20
2.6	Formato de la Subcapa LLC . . . . .	21
2.7	Formato del Protocolo CSMA/CD . . . . .	22
2.8	Cuadro Comparativo de Protocolos Normalizados . . . . .	25
5.1	Capas del Sistema de Comunicaciones Propuesto . . . . .	57
5.2	Transacción Pregunta-Respuesta . . . . .	59
5.3	Transacción de Notificación . . . . .	59
5.4	Relación Mensaje-Transacción . . . . .	59
6.1	Utilización de la Red (normal) . . . . .	74
6.2	Utilización de la Red (disparo) . . . . .	75
6.3	Disponibilidad de una Red . . . . .	77

# Lista de Figuras

2.1	Sistemas Distribuidos	12
2.2	Arquitectura MAP	26
3.1	Sistema de Control Distribuido	29
3.2	Niveles de Control	33
4.1	Modelo Conceptual del Sistema de Comunicaciones	45
4.2	Estructura en Capas del Sistema de Comunicaciones	47
5.1	Unidad de Adquisición de Datos	51
5.2	Arquitectura del Controlador de Com.	53
5.3	Arquitectura del Equipo del SDCD	54

## Capítulo 1

# INTRODUCCION

El gran avance tecnológico alcanzado en el diseño de computadoras y redes de comunicación, han causado un uso creciente de computadoras personales y microprocesadores en un sinúmero de aplicaciones; lo mismo se habla de sistemas computarizados para el cálculo de nómina en oficinas , que sistemas para la automatización de plantas industriales.

Esto ha traído como consecuencia, en el sector industrial, el uso de módulos inteligentes que realizan una o varias funciones y permiten llevar a cabo la automatización de la planta.

En el sector industrial los sistemas distribuidos han surgido como respuesta a la necesidad de tener sistemas de producción más eficientes, productos de más calidad y empresas más competitivas.

Para lograr satisfacer estas necesidades se requiere un plan integral de automatización que incluya:

- Supervisión independiente de cada punto crítico del proceso, en donde la necesidad de actuar sobre el proceso es inmediata y requiere controlar máquinas y dispositivos por medio de módulos inteligentes basados en microprocesadores.
- Supervisión global del proceso en donde computadoras de mayor capacidad manejan bases de datos, reportes de tareas y funciones de optimización del proceso en general.

Los sistemas distribuidos necesitan mecanismos de comunicación que permitan a los elementos del sistema el intercambio eficiente y confiable de información y el compartimiento balanceado de recursos. Esto se logra por medio de un sistema de comunicaciones de redes locales, las cuales están siendo usadas con más frecuencia para cumplir con estas tareas. Se habla de redes locales debido a que la necesidad de conexión se limita a áreas reducidas, no mayores de 1 km a la redonda.



## 1.1 Objetivo

El objetivo del presente trabajo es el de proponer una arquitectura de red local, que cubra las necesidades de comunicación de sistemas de control distribuido (SDCD) para Centrales Termoelectricas normalizadas, la arquitectura propuesta debe proporcionar una alta disponibilidad y eficiencia en cuanto al uso de recursos y tiempos de respuesta.

Para lograr este objetivo se desarrollarán los siguientes puntos:

- Investigar el estado del arte de los protocolos normalizados para redes locales y sistemas de control distribuido.
- Presentar un análisis comparativo que muestre las ventajas y desventajas de los protocolos estudiados.
- Investigar métodos de análisis de eficiencia para evaluar sistemas de comunicaciones.
- Presentar modelos simples para el análisis de funcionalidad de protocolos .
- Identificar y especificar las necesidades de comunicación en el sistema de control distribuido.
- Definir cada una de las capas de comunicación necesarias para la aplicación.
- Proponer y evaluar la arquitectura de comunicaciones.

## 1.2 Alcance

El alcance del presente trabajo consiste en desarrollar lo siguiente:

- Especificación de cada una de las capas de comunicaciones.
- Especificación formal del protocolo de interacción con los programas de aplicación, para lo cual se deberá:
  - Identificar procesos y servicios.
  - Especificar las funciones primitivas de servicio.
  - Especificar las reglas de atención a usuarios.
- Diseño de la arquitectura física, realizando análisis de tiempos de respuesta, disponibilidad y uso eficiente del medio.

### 1.3 Contribución

Una de las necesidades prioritarias del país es la de disminuir las erogaciones que por concepto de importaciones tecnológicas se realizan. En la actualidad en el país en el área de supervisión y control de procesos en forma automatizada, se tienen que adquirir los sistemas a empresas transnacionales. De los sistemas que nos venden el costo esta formado por:

- Costo de equipo (hardware): computadoras y periféricos. (40%)
- Costo de software del sistema: compiladores, ensambladores y sistema operativo. (5%)
- Costo de software de aplicación: programas de control, programas de adquisición de datos y programas de presentación de información. (35%)
- Costo del servicio de instalación y mantenimiento. (20%)

Estos costos son sumados y multiplicados por un factor de ganancia.

En lo que se refiere a equipo, México es todavía un país receptor y comprador de tecnología del extranjero.

Por otra parte, el caso de desarrollo de software de aplicación requiere de inversiones relativamente pequeñas y el fuerte apoyo que brindan las instituciones de investigación científica y tecnológica, dan las condiciones para incursionar en este campo. Además si consideramos que un 35% del costo del sistema corresponde a los programas de aplicación, es tiempo ya de la integración de sistemas, la cual consiste en comprar equipo con un proveedor de sistemas de cómputo y diseñar los programas de aplicación, para que en conjunto formen un sistema que satisfaga una necesidad específica.

*A nivel nacional, esta tesis servirá de base para realizar trabajos de aplicación que lleven al diseño e integración de una red local para un sistema de control distribuido de una central termoeléctrica.*

*Además sirve como medio de difusión de la tecnología actual a nivel internacional, relacionada con redes locales.*

*Finalmente esta tesis muestra una metodología de adaptación de la tecnología a las necesidades del usuario.*

## 1.4 Contenido de la Tesis

El presente trabajo está organizado en siete capítulos y las referencias bibliográficas.

- Inicialmente se presentan aspectos generales involucrados en el tema, así como la presentación de los objetivos que se persiguen en el trabajo y los beneficios que aporta.
- En el capítulo 2 se describe como construir un sistema distribuido y qué problemas deben ser considerados. Se inicia el capítulo enumerando características generales de los sistemas: multiplicidad de recursos, distribución física, sistemas operativos, transparencia y cooperación. A continuación se presentan los problemas relacionados con el diseño de sistemas: correcta y rápida ejecución de algoritmos, disponibilidad, flexibilidad, sincronización y recuperación de fallas. Enseguida se presenta la estructura y composición de sistemas distribuidos y finalmente se describen los protocolos de enlace normalizados, así como aquéllos de aplicación industrial.
- En el capítulo 3 se describen cada uno de los elementos funcionales que forman el sistema de control distribuido. Se inicia el capítulo describiendo de manera general las funciones de un sistema de control distribuido y enseguida se presenta el modelo de control distribuido jerárquico, así como la organización de la operación y control de Centrales Termoelectricas. Finalmente se describe a cada uno de los futuros usuarios del sistema, así como una descripción de las principales tareas del SDCD.
- En el capítulo 4 se realiza una especificación funcional de la red de comunicación de datos, la cual cubre ampliamente las necesidades de comunicación del usuario.
- En el capítulo 5 se propone una arquitectura de la red, la cual cumple con las especificaciones funcionales de la red establecidas en el capítulo anterior. En esta propuesta se incluyen: topología de la red, método de acceso y capas de comunicación de acuerdo al modelo OSI que serán necesarias para soportar la aplicación.
- En el capítulo 6 se utiliza un método quasi-dinámico para evaluar el sistema de comunicaciones, en función del tiempo de respuesta y utilización del medio.
- En el capítulo 7 se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo desarrollado como tesis.
- Por último, al final de la tesis, se dan las referencias bibliográficas.

## 1.5 Resumen

Las redes locales son muy útiles en aplicaciones como el control de procesos de una industria, el manejo de información en oficinas, centros de cómputo en universidades, entre otros. La complejidad del medio ambiente de aplicación y la gran variedad de requerimientos que deben cumplirse, hace necesario analizar la forma de ofrecer los servicios que el usuario solicita de la red.

En esta tesis se desarrolla el diseño de una red local de un sistema de control distribuido. Partiendo de la base que para el diseño es necesario, por un lado conocer las características de la aplicación, así como las necesidades del usuario y por otro lado tener conocimiento de las tendencias en redes locales y el mercado de productos disponibles.

La metodología que nos permitió lograr el diseño de la red local, consiste de las siguientes tres fases:

- **DETERMINACION DE LA ESPECIFICACION.-** En esta etapa se analizan los requerimientos del usuario para llegar a una especificación técnica y funcional de los servicios que de la red se necesitan.
- **DISEÑO.-** Basados en la especificación, se selecciona una serie de alternativas de diseño como son: topología, medio de transmisión y método de acceso. Después se localiza cada uno de los componentes de la red, se establece la trayectoria para el medio de transmisión y se calcula la longitud del mensaje.
- **EVALUACION FUNCIONAL.-** Una vez que el desarrollo de las alternativas de diseño están completas, se hace una evaluación de éstas usando simulación o utilizando un modelo matemático.

Hasta lo aquí expuesto se ve claramente que para realizar el diseño de una red se requieren: conocimiento de las características de la aplicación y de las necesidades del usuario de la red, conocimientos de redes locales, investigar las tendencias en el uso de protocolos para redes locales y métodos de comparación funcional de redes.

## Capítulo 2

# SISTEMAS DISTRIBUIDOS

### 2.1 Sistemas de Procesamiento Distribuido

Un sistema de procesamiento de datos distribuido es aquél en el que las funciones de computación están divididas entre varios elementos de cómputo, en donde cada elemento tiene capacidad de procesamiento y cuenta con recursos que pueden ser propios o compartidos por medio de una red de comunicaciones.

Un sistema de procesamiento centralizado es aquél en el que las funciones de procesamiento y manejo de recursos son realizadas por un procesador.

Al menos cuatro componentes de un sistema pueden ser distribuidos: equipo, datos, sistema operativo y procesamiento.

Las características principales de un sistema distribuido son:

- Multiplicidad de recursos de propósito general, incluyendo recursos físicos y lógicos, que pueden ser asignados a tareas específicas en forma dinámica. La asignación de recursos debe ser posible sin afectar la operación de aquellos recursos que no están directamente involucrados con la asignación.
- Distribución física de los componentes del sistema e interactuando a través de una red de comunicaciones. La transferencia de mensajes por medio de una red, es un excelente ejemplo de cooperación entre dos recursos. Tales transferencias involucran la participación de al menos dos elementos, en el cual las dos partes deben cooperar para completar satisfactoriamente la transferencia.
- Sistemas operativos de alto nivel para integrar los componentes físicos y lógicos de un sistema en un todo. Cada uno de los procesadores del sistema deben tener sistemas operativos individuales y un buen conjunto de políticas debe gobernar la operación integrada de todo el sistema. Un sistema operativo de alto nivel debe proporcionar facilidades al usuario para explotar los recursos distribuidos.
- Transparencia del sistema. Si un sistema tiene las características citadas arriba, la interfase de usuario debe ser tan simple como la presentada por un sistema centralizado. El usuario debe solicitar una acción especificando lo que quiere realizar y no quién lo hará. La existencia del sistema distribuido debe ser completamente transparente para el usuario.
- Cooperación autónoma. Un sistema distribuido debe ser diseñado de manera tal que las operaciones de todos los componentes o recursos sean autónomos. En el nivel físico éste puede ser completado por el uso de protocolos de transmisión, en donde la transmisión

de mensajes requiere de la cooperación tanto del que envía el mensaje como del que lo recibe, a nivel lógico se requiere el mismo grado de cooperación.

### 2.1.1 Tiempo Real

En la industria, la noción de tiempo real está estrechamente vinculada a la índole del proceso. Dependiendo de que éste sea continuo o discontinuo, complejo o no, lento o rápido, cambia radicalmente la noción de tiempo real. El usuario o el sistema debe ser capaz de responder a cualquier demanda del proceso, en tiempos que sean compatibles con éste. De lo contrario pueden ocurrir graves perturbaciones en el proceso, que pueden ocasionar daños irreparables. El tiempo real se ve reflejado en cada uno de los elementos que forman un sistema, por ejemplo, veamos el caso del comportamiento de un sistema operativo residente en un controlador. El sistema de control debe ser capaz de tomar en cuenta interrupciones procedentes de elementos del proceso, es decir, de sensores. El sistema después de recibir la interrupción debe salvar la configuración en que se encuentra en ese momento para poder recuperarla una vez solucionados los problemas. A continuación el sistema debe cambiar la configuración (medio ambiente), para ser capaz de tratar las interrupciones, por ejemplo, abrir válvulas, reconocer alarmas, etc., y una vez solucionados los problemas, es preciso que recupere la configuración inicial con el fin de proseguir el control. En el intervalo de reconocimiento y procesamiento de la interrupción pueden ocurrir otras interrupciones que, también deben ser tratadas; el ciclo de procesamiento de una interrupción tiene que ser compatible con el proceso. En los sistemas para la supervisión y control de procesos asociado al tiempo real se tiene el tiempo de cambio de estado o cambio de valor de una variable, que define el intervalo de tiempo en que se puede esperar una interrupción, este tiempo está dado por el período de muestreo de las variables ( Teorema de Nyquist ver ref[L9] ) que es una característica del tipo de proceso que se esté controlando, ya que por ejemplo, mientras las temperaturas cambian lentamente, los flujos tienen cambios más rápidos, algunos ejemplos de los períodos de muestreo requeridos en algunas industrias se dan en la tabla 2.1, ref[A28].

Aplicación	tiempo de muestreo (seg)	tiempo de respuesta a alarmas (seg)
Generación de electricidad	2.0	0.1
Industria del petróleo	1.0	0.1
Industria química	0.1-0.6	0.01-1.0
Industria del metal	0.5	0.01
Industria de alimentos	0.1-0.6	1.0
Industria del papel	0.6-300	0.6
Telecomunicaciones	0.2	1

Tabla 2.1: Tiempos de Respuesta para Diferentes Industrias

**Tiempo de respuesta a alarmas.** Este tiempo representa el intervalo desde que una condición crítica (por ejemplo, una variable de control tiene un valor fuera del rango normal permitido) es reconocida por el controlador hasta que una secuencia de acciones correctivas son iniciadas en el controlador, ya sea por un procesamiento local o remoto de la alarma. En el diseño de los sistemas de comunicación, el tiempo de respuesta es el que establece el tiempo máximo de acceso a la red, es decir, el tiempo que debe esperar un nodo para

enviar un mensaje en condición de máxima carga.

En el diseño de la red, se hace énfasis que el tiempo de acceso a la red sea determinístico.

### 2.1.2 Problemas en el Diseño de Sistemas Distribuidos

Las propiedades que un sistema de computación distribuido debe tener para realizar el control y monitoreo de un proceso en tiempo real se describen a continuación y son basadas en un modelo descrito por Le Lann 83 ref[A3] :

- Correcta ejecución de algoritmos (correctness).- Esta propiedad se refiere al correcta ejecución de algoritmos de monitoreo y control, y establece que partiendo de un estado estable y al realizarse operaciones sobre la variable, el algoritmo debe llevar a un estado seguro de operación.
- Obtención de resultados en tiempos compatibles con el proceso (promptness).- Se asume la existencia de un tiempo de referencia físico que es común al sistema y a sus componentes. El sistema debe producir resultados válidos en los tiempos marcados por la aplicación. Resultados válidos obtenidos fuera de tiempo ocasionan situaciones de operación crítica del sistema.
- Confiabilidad y disponibilidad (robustness).- Esta característica indica qué tan bueno es el sistema para continuar trabajando al ocurrir fallas mecánicas y algorítmicas en el sistema. La confiabilidad y disponibilidad pueden ser alcanzadas por medio de la sincronización, tolerancia y prevención de fallas.
- Flexibilidad.- Esta propiedad se refiere a que aún cuando el diseño de un sistema se hace pensando en que va a durar mucho tiempo, el sistema no permanece estático durante su vida de operación y está expuesto a modificaciones, por lo que debe brindar facilidades que le permitan adaptarse a los cambios, la flexibilidad que ofrecerá debe ser funcional, topológica y computacional.

Para alcanzar verdadera distribución, el sistema debe estar formado por equipo y programas (algoritmos), que tengan estas propiedades. Para el caso de algoritmos distribuidos éstos deben tener propiedades atómicas que les permita ejecutarse concurrentemente.

Mecanismos de sincronización y prevención de fallas se hacen indispensables para realizar diseños confiables, a continuación se describirán estos mecanismos.

#### Sincronización

El problema de sincronización se enfrenta cuando se tienen varios procesos en un sistema y se encuentran compartiendo recursos o cooperando para realizar una actividad común.

Un sistema, descrito por Kramer 83 ref[A4], consiste de objetos (procesador, memoria secundaria y dispositivos de entrada/salida, entre otros) y recursos (memoria, bases de datos y procesos, entre otros), se espera que el sistema realice funciones específicas mientras asegure el uso eficiente de los recursos, buena funcionalidad, consistencia de datos y carencia de interbloqueos (deadlock). Para poder cumplir con estas características, se deben tomar decisiones de control basadas en el estado actual del sistema. En sistemas centralizados el problema es más directo, ya que todos los procesos tienen la misma visión del sistema. En sistemas distribuidos las cosas se complican un poco más, la información se encuentra localizada en diferentes estaciones físicas que realizan el procesamiento, en algunos casos la actualización de la información se realiza en diferentes marcos de tiempo, debido a retrasos

en el sistema de comunicaciones. Sumado a estos problemas se tiene la posibilidad de errores y fallas en nodos del sistema, generalmente bajo estas condiciones el conocimiento de un estado global completo es imposible, y se usan mecanismos de sincronización para asegurar que los procesos tengan una vista parcial pero consistente del sistema.

Procesos cooperantes usan mecanismos de sincronización para coordinar el acceso a recursos compartidos o para asegurar que las acciones ocurran en un orden específico. Una manera de conseguir que las acciones ocurran en un orden es por medio del procesamiento secuencial de procesos, esta técnica es ineficiente y degrada la funcionalidad del sistema. Los sistemas distribuidos modernos brindan operaciones atómicas como un medio de preservar la consistencia, una operación consiste de

un número de acciones, la atomicidad garantiza, Le Lann 83 ref[A3], que:

- O bien todas las acciones son terminadas o ninguna acción es realizada (se regresa al estado anterior).
- Los estados intermedios no son visibles a otras operaciones.

Acciones que no se interfieran pueden realizarse en paralelo, mientras que acciones conflictivas deben ocurrir secuencialmente, la atomicidad asegura que las decisiones de control son basadas en información consistente.

Otras estrategias para la sincronización son el uso de:

Relojes lógicos Lamport 78 ref[A6] para marcar el tiempo de emisión del mensaje y seleccionar el proceso de solicitud más temprana.

Uso de ficha (Token) circulante en anillos lógicos Le Lann 77 ref[A1].

Discusiones más completas del problema de sincronización en ambientes distribuidos son dadas en Le Lann 81 ref[A2] y Kohler 81 ref[A7].

El precio que se paga por tener sistemas muy confiables es el uso ineficiente de tiempo de ejecución.

**Una de las metas a alcanzar en el diseño de sistemas distribuidos es la de integrar soluciones confiables al menor costo en todos los niveles del sistema.**

### **Recuperación de Fallas**

Los sistemas distribuidos deben ser altamente confiables, es decir, deben mantenerse funcionando correctamente el mayor tiempo posible.

Para entender el término confiabilidad, veamos que pasa en un sistema carente de ésta.

En un sistema distribuido se tienen elementos conectados por medio de una red de comunicaciones, los elementos se encuentran compartiendo recursos como memoria o dispositivos de entrada/salida. Si pensamos en una aplicación en tiempo real en donde en un elemento se adquiere información y en otro se procesan y toman decisiones. Qué pasaría, si en condiciones de operación crítica ocurre una falla que impida que los elementos de adquisición y procesamiento se comuniquen?

A continuación describiremos algunos términos relacionados con confiabilidad: de acuerdo con Stankovic 84 ref[A8]:

- Falta.- es un defecto mecánico o algorítmico que produce un error.
- Error.- es una unidad de información que cuando se emplea en un algoritmo provoca una falla del sistema.



- **Falla.**- es un evento durante el cual el sistema se desvía de su comportamiento normal ( de acuerdo a especificaciones ).
- **Confiabilidad.**- se define como el grado de tolerancia de errores y fallas del sistema, ésta se incrementa evitando fallas y tolerándolas.

Para evitar fallas se requiere que componentes altamente confiables formen el sistema.

Para tolerar fallas se requieren mecanismos de detección de error y el uso de equipos y programas redundantes.

A continuación describiremos como son tratados los errores y fallas a nivel sistema de comunicaciones, sistema operativo, lenguajes de programación y bases de datos.

A nivel del sistema de comunicaciones los mensajes contienen códigos detectores de error, entre los más usados está el CRC16 y CRC32. A nivel enlace de datos se usan protocolos con reconocimiento de mensajes y se tienen generalmente dos tipos , reconocimiento positivo que indica que el mensaje se recibió sin errores y el negativo que indica que el mensaje fue alterado. Tiempos máximos de espera son establecidos para detectar pérdida de mensajes o fallas en líneas de comunicación. Algunos protocolos usan un circuito virtual que garantiza la transmisión confiable de mensajes, protocolos de control de flujo son diseñados para evitar congestión y pérdidas de mensajes. Algoritmos de enrutamiento contienen múltiples rutas para cada destino o un método de generar una nueva ruta al existir alguna falla. Otras formas de incrementar la confiabilidad es por medio de componentes de respaldo, verificación de consistencia y rangos, y procedimientos especiales de prueba de componentes.

Todas las técnicas usadas a nivel sistema de comunicaciones también son usadas a nivel sistema operativo. Además los sistemas operativos deben soportar duplicación de archivos, ejecución de procedimientos de prueba desde dispositivos remotos y evitar puntos de falla por medio del respaldo y control distribuido.

Los lenguajes de programación deben incorporar tolerancia a fallas, el caso de ARGUS ref: A10| por ejemplo soporta objetos atómicos, transacciones, llamadas a procedimientos remotos, y proporciona mecanismos para detectar y corregir interbloqueo (deadlock).

Bases de datos distribuidas hacen uso de muchas características que dan confiabilidad, entre éstas se tienen, tablas de memoria, transacciones, protocolos de recuperación de error y puntos de verificación. Una exposición más detallada sobre confiabilidad, sincronización y mecanismos de recuperación de fallas podrá ser encontrado en Kohler 81 ref: A7| y Randell 78 ref: A9|.

Además de los problemas de sincronización y tolerancia a fallas, también se tienen que resolver:

- Identificación de los recursos (Naming).
- Administración y control de recursos.
- Protección, contra accesos no autorizados.
- Representación de la información (codificación y decodificación).

SOFTWARE DE APLICACION	
Utillerias: Adm. de B.D	Sistema de Comunicaciones
Administracion local	
Nucleo	
Hardware local	

Tabla 2.2: Estructura de una Estación de un S.D

## 2.2 Estructura y Composición de Sistemas Distribuidos

La estructura general de un sistema distribuido se presenta en la figura 2.1 y consiste en un conjunto de estaciones de cómputo físicamente interconectadas por una red de comunicaciones, en donde cada estación tiene la capacidad de procesar y almacenar datos, puede tener conectados dispositivos periféricos como impresoras, controladores de proceso o algún otro dispositivo. El sistema de comunicaciones es responsable de establecer comunicación entre las diferentes estaciones del sistema.

Cada estación local tiene una estructura formada por equipo y programas, que es presentada en la tabla 2.2 .

A continuación describiremos la función de cada capa.

**PROGRAMAS DE APLICACION** .- Los programas de aplicación varían grandemente y varían de acuerdo a la aplicación del sistema. Las necesidades de la aplicación definen los servicios que el sistema operativo distribuido debe brindar, ejemplos de aplicaciones son el control de procesos, procesamiento de información, comunicación, manejo de dispositivos de entrada y salida. Los servicios son usualmente brindados como un conjunto de mecanismos disponibles del lenguaje de programación. Algunos de los problemas que hay que enfrentar al realizar programas de aplicación en ambientes distribuidos son:

- Descomposición de funciones en procesos distribuidos, el proceso es un componente modular apartir del cual se construyen los programas de aplicación.
- Administración de los procesos de aplicación.- Toma de decisión entre la administración y control de procesos de aplicación en forma centralizada o distribuida.
- Distribución de datos.- Los datos en el sistema pueden ser particionados y distribuidos en diferentes puntos del sistema, ésto puede causar respuestas lentas al tiempo de acceder la información en forma remota o de otra manera se puede optar por tener información duplicada, lo que lleva a la necesidad de contar con mecanismos que aseguren consistencia de la información.
- Comunicación entre procesos, los procesos de aplicación se comunican para cooperar y sincronizar sus actividades.

**UTILERIAS** Están formadas por servicios brindados por el sistema como por ejemplo transferencia de archivos, manejadores de dispositivos periféricos, terminales virtuales, entre otros.

**ADMINISTRACION LOCAL** Programas para la creación y destrucción de procesos

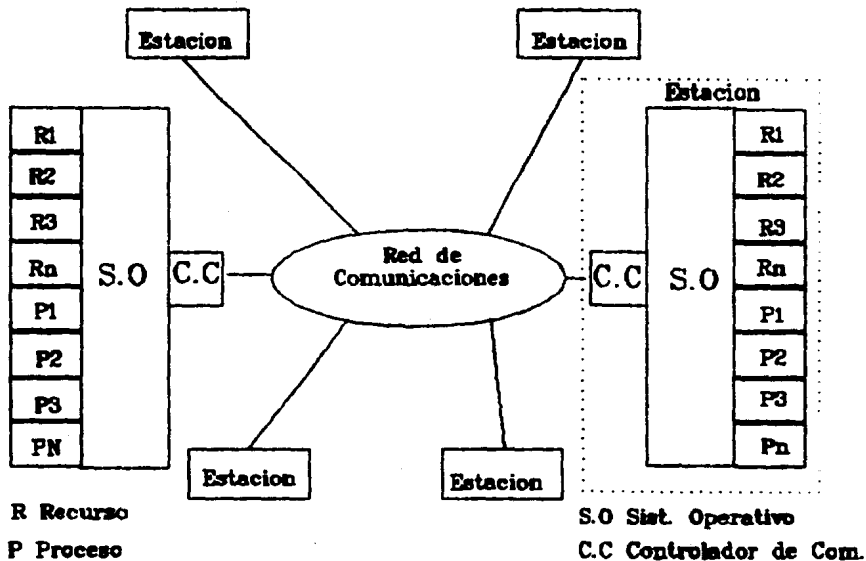


Fig. 2.1 Estructura de Sistemas Distribuidos

y el manejo local de recursos.

**NUCLEO** Esta capa soporta comunicación entre procesos y proporciona el software mínimo necesario para la creación de procesos y el acceso a memoria, manejo de entrada/salida, además debe brindar protección y multitareas.

**HARDWARE** Es el conjunto de componentes que forman la estación y está formado por uno o más procesadores, memoria, dispositivos de entrada/salida, memoria e interfaces de comunicaciones. El hardware debe brindar facilidades para realizar operaciones de suspender y activar procesos, así como el manejo de interrupciones y traps para la detección de errores.

**SISTEMA DE COMUNICACIONES** Es el responsable de transportar mensajes del sistema y de los programas de aplicación entre estaciones, acepta mensajes de los programas de la estación y los multiplexa para transmitirlos por un medio compartido, también recibe mensajes de la red, los demultiplexa y los distribuye entre los diferentes programas. De manera parecida al sistema operativo, los módulos de comunicación cooperan usando protocolos para brindar facilidades de un sistema global de comunicaciones.

**SISTEMA OPERATIVO DISTRIBUIDO** es el encargado de integrar el sistema distribuido en una entidad lógica, coordina y unifica las estaciones distribuidas en un sistema simple, está formado por un ejecutivo global, más utilerías locales, más el ejecutivo de cada estación.

La relación entre el sistema de comunicaciones y el núcleo de la estación no está comprendida en el modelo OSI; en muchos sistemas distribuidos, los procesos de aplicación usan las mismas primitivas para comunicación entre procesos locales o remotos, sin embargo la comunicación local es soportada por el núcleo y la remota por el sistema de comunicaciones. El sistema de comunicaciones es implantado como un conjunto de procesos de aplicación que es soportado por el núcleo y usa las facilidades de comunicación entre procesos que el núcleo proporciona. El ejecutivo de cada estación administra los recursos tanto para los procesos de aplicación como para los de comunicación. La estructura del ejecutivo, el sistema operativo y el sistema de comunicaciones son independientes, en la tabla 2.3 es mostrada la estructura de estos sistemas.

Aplicación	Ejecutivo	Sistema Operativo
Presentación		
Sesión		
Transporte		
Red		
Enlace		
Física		

Tabla 2.3: Estructura Independiente del S.O y del S. de C.

### 2.2.1 Primitivas de Comunicación

Las primitivas de comunicación son funciones implantadas a nivel sistema operativo (QNX, Unix) o lenguajes de programación (CSP, ADA), que brindan facilidades de comunicación a las tareas para el envío y recepción de mensajes, ver ref. A11 y A12.

En ambientes distribuidos las primitivas de comunicación permiten el intercambio de mensajes tanto de tareas locales como remotas.

Existen varias primitivas de comunicación propuesta para ser usadas en sistemas distribuidos entre estas se tienen ref[L6]:

- Envío asíncrono como fué adoptado por Liskov .
- Envío síncrono como es manejado en CSP y Occam.
- Llamada a procedimientos remotos como es usado en ADA.

A continuación serán descritas cada una de estas primitivas.

#### Envío Asíncrono

El envío asíncrono proporciona un servicio para transmisión de información en forma unidireccional y multidestino, la tarea fuente no es bloqueada al solicitar este servicio, la tarea puede continuar tan pronto como el mensaje ha sido copiado por el manejador de comunicaciones o transmitido. Este servicio es útil para aplicaciones de tiempo real en donde las tareas deben ejecutar alguna actividad crítica y no pueden esperar por la confirmación de que el mensaje ha sido recibido por el destino. El servicio es de la forma:

```
SEND message TO objecttask(s);

RECEIVE message FROM sourcetask;
```

La operación de recepción en la tarea destino causa que sea suspendida, si no hay mensaje en el buffer de mensajes recibidos. La tarea destino puede esperar el arribo de mensajes de diferentes fuentes, además para no quedar suspendida en forma indefinida, se le agrega un tiempo de espera máximo (timeout). La recepción con estas modificaciones es de la forma:

```
SELECT
RECEIVE message1 FROM source1
OR
RECEIVE message2 FROM source2
.....
ELSE
TIMEOUT(period);
END SELECT.
```

#### Envío Síncrono

Esta primitiva proporciona un servicio de envío de mensajes en forma unidireccional, la tarea fuente es suspendida al momento de solicitar el envío y hasta que la tarea destino recibe el mensaje, de manera similar la tarea destino es suspendida hasta que la tarea fuente realiza

el envío. La notación de las primitivas en notación CSP es:

Operación de envío:

```
Objecttask!Message;
```

Operación de recepción:

```
Sourcetask?Message;
```

Tareas destino pueden esperar por la ocurrencia de un mensaje de más de una fuente por medio de comandos custodiados, además como una mejora a CSP se propone el incluir un tiempo máximo de espera, la notación de estas operaciones es la siguiente:

```
[Source1task?Message1-
Source2task?Message2-
-----
SourceNtask?MessageN-
Timeo(period) ----- ]
```

El envío síncrono brinda un servicio unidireccional y no proporciona independencia entre las tareas, ya que la transacción tiene lugar cuando las dos tareas están listas, esto lleva a la tarea fuente a ser suspendida en forma indefinida si el mensaje no es aceptado por la tarea destino o si hay fallas en la comunicación, lo que causa problemas de robustez.

### Llamada a Procedimientos Remotos

Esta primitiva proporciona un servicio de envío de mensajes en forma bidireccional, una transacción consiste de una llamada a un procedimiento remoto, la tarea fuente envía un mensaje con parámetros a la tarea destino y es suspendida hasta que la llamada es concluida. La tarea destino es suspendida al entrar a esperar la llamada y una vez que acepta la llamada, ejecuta las acciones asociadas con los parámetros de entrada. Como con las otras formas de comunicación también se proporciona una recepción selectiva con tiempos de espera máximo. La transacción es uno a uno y la tarea fuente se sincroniza con la tarea destino. Transacciones bidireccionales son una forma esencial de comunicación en programación en donde entre tareas existe una relación cliente-servidor. La notación para las operaciones de envío y recepción en el lenguaje ADA son:

Operación de envío:

```
select
Object request(in-parameters,out-parameters);
or
delay(period)
end select;
```

Operación de recepción:

```
accept request(parameters) do
(* Service request and set reply parameters *)
end request;
```

La proposición delay(period) es un tiempo máximo de espera para la aceptación de la llamada por el procedimiento remoto y no un tiempo máximo de espera para la terminación de la transacción ; es decir que la tarea fuente reciba los parámetros de regreso. Entonces las fallas que se detectan son en el envío del mensaje de llamada al procedimiento y fallas en la tarea fuente que no le permiten aceptar la llamada.

## 2.3 Arquitectura y Protocolos

En los últimos años ha habido un gran desarrollo en redes locales. Sin embargo la gran mayoría de los sistemas están compuestos por una de dos topologías y uno de un puñado de protocolos de acceso al medio ref[A34]:

- Topología de bus
  - CSMA/CD
  - TOKEN BUS
  
- Topología de anillo
  - TOKEN RING
  - SLOTTED RING
  - REGISTER INSERTION

Estas tendencias pueden no ser las mejores, sin embargo por razón de popularidad CSMA/CD o por razón de versatilidad TOKEN, han sido seleccionadas por los fabricantes de equipo como los sistemas a ser desarrollados y usados en redes locales.

### 2.3.1 Modelo OSI

A mediados de los años 70s era casi imposible interconectar por medio de una red, equipos de diferentes proveedores, esto causado porque cada fabricante establecía sus normas y reglas de fabricación de equipo y programas para interconectarlos.

Los fabricantes de equipo notaron que no era conveniente diseñar sistemas bajo normas cerradas, ya que presentaba mayor ventaja (incremento de las ventas en el mercado internacional, competencia con otros fabricantes del mismo equipo) el estandarizar la fabricación de equipo y protocolos de interconexión.

A mediados de los 70s se estableció en E.U. un organismo internacional para estandarizar la interconexión de equipos (ISO), este organismo se formó con representantes de fabricantes de equipo ( Computer and Business Equipment Manufacturers Association CBEMA ) y por Instituciones normativas ( American Standard Institute ANSI y The National Bureau of Standard NBS, entre otras ). El trabajo de este organismo se concretó a identificar conceptos y funciones de sistemas basados en redes de computadoras. Se identificaron 44 conceptos y funciones que fueron clasificados en 7 niveles, surgiendo así el modelo abierto de interconexión OSI.

El modelo OSI normaliza el manejo de señales eléctricas en el medio, protección de mensajes, direccionamiento de usuarios en forma lógica, inicio y paro de sesión, compactación de datos, solicitud y transferencia de archivos, acceso a bases de datos, entre otras.

En los últimos años el modelo OSI ha madurado y ya se tienen estándares en los dos primeros niveles del modelo OSI, los estándares se presentan como el proyecto 802, el cual abarca la normalización de redes locales. Los estándares 802 contemplan una de dos topologías: bus o anillo; y uno de los siguientes protocolos para controlar el acceso al medio:

- CSMA/CD (802.3)
- TOKEN PASSING BUS (802.4)
- TOKEN PASSING RING (802.5)



En la actualidad existe una gran cantidad de fabricantes de equipo (IBM, WESTERN DIGITAL, DATA GENERAL, SYTEK INC, XEROX, entre otras) que han diseñado equipo que cumple con los estándares 802.

La adhesión a los estándares es tal que se han desarrollado circuitos de alta escala de integración (Intel 8256 y 83588, Standard Microsystems COM9026, Western Digital WD 2840) que manejan por sí solos una o varias capas del modelo OSI.

A nivel usuarios de equipo de cómputo, también se han dictado estándares. En el caso de General Motors quien se dió cuenta que sus operaciones eran poco competitivas con aquéllas llevadas por los fabricantes de autos en Japón y adoptó la estrategia de automatizar sus plantas. Se vió en la necesidad de adquirir equipo de diferentes proveedores, para la interconexión de éstos se basó en el estándar 802.4, además estableció estándares en las capas superiores del modelo OSI que deberían cumplir los equipos a adquirir, así fué como surgió el Manufacturing Automation Protocol MAP. Este protocolo está siendo respaldado fuertemente por empresas que se dedican a la automatización de plantas industriales (FOXBORO, ALLEN BRADLEY, FISHER CONTROLS INTERNATIONAL y TANDEM COMPUTERS entre otras). El protocolo MAP también ya cuenta con soporte de hardware a nivel circuito integrado y de tarjeta.

Por otro lado, para la interconexión de equipos de oficina, se propusó el Technical and Office Protocol (TOP).

MODELO OSI	
Capa	Nombre
7	Aplicación
6	Presentación
5	Sesión
4	Transporte
3	Red
2	Enlace
1	Física

Tabla 2.4: Capas del Modelo OSI

En la tabla 2.4 se presenta el modelo OSI y a continuación se explica brevemente la función de cada capa del modelo ref[L4]:

- **CAPA FISICA.**- La capa física está relacionada con la transmisión de bits sobre un canal de comunicaciones. El diseño de esta capa debe asegurar que cuando en un lado del sistema se envía un bit en estado alto, debe recibirse al otro lado como un bit en estado alto. problemas típicos que deben ser resueltos, están relacionados con la cantidad de voltaje necesario para representar un uno lógico y cuánto voltaje para representar un cero lógico, así como cuánto tiempo dura un bit. si la comunicación se puede realizar en ambas direcciones y al mismo tiempo . cómo se establece la conexión inicial, cómo se termina el enlace , cuántos pines tendrá el conector de red y cuáles serán usados. En

algunos casos las facilidades de transmisión consisten en tener canales físicos múltiple, para aumentar la confiabilidad de la capa física.

En resumen la capa física está relacionada con la interface mecánica y eléctrica de la subred.

- **CAPA DE ENLACE.**- La capa de enlace tiene como tarea el formar una línea de transmisión sin errores(línea virtual) a partir de las facilidades de la capa física.La capa de enlace realiza esta tarea dividiendo el mensaje en pequeños paquetes (frames), transmitiendo los paquetes secuencialmente y procesando los reconocimientos por paquetes que ha recibido correctamente.De manera que la capa física acepta y transmite cadenas de bits, la capa de enlace crea y reconoce estructuras de bits(frames). Ruido en las líneas pueden destruir una estructura completa de información, en este caso los programas de la capa 2 en la máquina fuente deben retransmitir la información. La capa de enlace debe resolver problemas causados por daños, pérdidas y duplicación de información, de tal manera que la capa 3 suponga que está trabajando con una línea virtual.
- **CAPA DE RED.**- La capa de red controla la operación de la subred, es tarea de esta capa el determinar las características de interfaz entre la computadora central y los nodos, y cómo los paquetes son enrutados a través de la red. La clave del diseño de esta capa radica en cómo se realiza el enrutamiento, el que puede estar basado en una tabla estática que esté ligada a la configuración de la red o bien dinámica y determinada cada vez que un nuevo paquete debe ser enviado. Si muchos paquetes están presentes en la red al mismo tiempo, se estorbarán entre ellos, produciendo un cuello de botella; el control de congestión también es función de esta capa.
- **CAPA DE TRANSPORTE.**- La tarea fundamental de esta capa es aceptar datos de la capa de sesión, dividir el mensaje en paquetes si es necesario, y pasarlos a la capa de red y asegurarse que todas las piezas lleguen al otro lado. La capa de transporte realiza un verdadero enlace entre el fuente y el destino; ya que un programa en la computadora fuente tiene una conversación con un programa similar en la computadora destino.En las tres capas anteriores el protocolo es realizado por la computadora y la nodo inmediato y no por las computadoras fuente y destino.La mayoría de las computadoras en la actualidad son multitareas, lo cual significa que varios programas se encuentran generando mensajes, que podrán estar entrando y saliendo de la computadora. Es función de la capa de transporte el marcar cada mensaje de acuerdo al programa al que pertenece. Al multiplexar varios mensajes en un canal físico, la capa de transporte debe tener cuidado de activar y desactivar las conexiones a través de la red. Esto implica un mecanismo que permita a un mensaje de un programa de una computadora comunicarse con el programa adecuado en la otra computadora. En la arquitectura del modelo OSI no se especifica nada relacionado con el diseño de esta capa, en algunos casos la capa de transporte es implementada por una parte del sistema operativo de la computadora, en contraste con la capa de red que es típicamente diseñada en función de un manejador de dispositivos de entrada-salida(driver). La capa de enlace de datos y la capa física son implementadas normalmente en hardware.
- **LA CAPA DE SESION.**-La capa de sesión es la interfaz entre usuarios de la red, es con esta capa que el usuario debe negociar para establecer una conexión con procesos de otras computadoras.Una vez que la conexión ha sido establecida. es función de esta capa manejar el diálogo en forma ordenada. Una sesión puede ser usada para permitir a un usuario entrar en un sistema remoto de tiempo compartido o para transferir un archivo entre computadoras.Para establecer una sesión el usuario debe dar la dirección de con

CAPA	PROTOCOLO
APLICACION	Aplicaciones de red como IBM PC networking
PRESENTACION	Sistema operativo como DOS
SESION	Netbios
TRANSPORTE	TCP Arpanet
RED	IP Internet
ENLACE	Ethernet, IEEE 802.3
FISICA	Cables, conectores y hardware de red

Tabla 2.5: Ejemplo de Aplicación del Modelo OSI

quién desea comunicarse. Iniciar una sesión es generalmente complicado, para empezar los involucrados en la conexión deben ser propiamente identificados, para saber si tienen derecho a conectarse, y quién o quiénes realizan el pago de la sesión. En algunas redes la capa de sesión y transporte son mezcladas en una sola, o bien la capa de sesión es suprimida si todos los usuarios de la red requieren una conexión simple.

- **LA CAPA DE PRESENTACION.**-Es función de esta capa el realizar transformaciones en los datos, con la finalidad de ser presentados al usuario en una forma entendible. La capa también ejecuta transformaciones en los datos para dar seguridad a la información que se está manejando (encrypting). Otra tarea más de esta capa es la conversión entre códigos de caracteres. Más común entre computadoras es que no todas manejan los mismos formatos de almacenamiento de archivos, así que la capa de presentación debe brindar también facilidades de conversión entre formatos de archivos. De la misma manera se tiene gran incompatibilidad entre terminales (CRTs), longitud de líneas y pantallas, conjunto de caracteres a desplegar, direccionamiento de cursor, son algunos de los problemas que también tienen que ser resueltos por esta capa.
- **CAPA DE APLICACION.**- Existe un número de servicios que son específicos a cada aplicación y son incluidos en esta capa. Esta capa sirve de interfaz al usuario para tener acceso a un conjunto de servicios de información distribuida; entre los servicios se incluyen la transferencia de archivos, transferencia de tareas, servicios de terminales virtuales y transferencia de documentos, entre otros.

A manera de ejemplo de uso del modelo OSI para estandarización de redes, en la tabla 2.5 se presenta la arquitectura de protocolos de una red usando computadoras personales ref[M2].

### 2.3.2 Protocolos de Redes Locales

Un protocolo de red local queda comprendido en las dos primeras capas del modelo OSI: capa física y capa de enlace.

La capa de enlace es dividida en la capa de enlace lógico (LLC) y la capa de control de acceso al medio (MAC).

La capa de enlace lógico soporta funciones de enlace independientes del medio, sus funciones específicas son: iniciar y controlar el intercambio de información (frames), organizar el flujo de datos, interpretar comandos y generar respuestas, realizar funciones de control y recuperación de error.

La capa de control de acceso al medio la cual soporta funciones dependientes del acceso al medio, usa los servicios de la capa física para proporcionar servicio a la capa de enlace lógico. La función de esta capa es controlar el acceso al medio.

De estas dos capas, LLC y MAC, la subcapa LLC es común a los protocolos normalizados y será descrita a continuación.

**CAPA DE ENLACE LOGICO** El funcionamiento de la subcapa de enlace lógico queda especificado por :

- Los servicios que proporciona.
- El protocolo que especifica sus funciones.
- La interfaz con la subcapa de acceso al medio.

Los servicios que proporciona son:

- **Servicio sin conexión y sin reconocimiento.**- este es un servicio del tipo datagrama que permite enviar y recibir tramas de información sin establecimiento de conexión previa, además los marcos no son reconocidos, ni el control de flujo ni recuperación de error son proporcionados. Este servicio soporta enlaces punto a punto, multipunto y difusión (broadcast). Este servicio es realizado por las siguientes funciones primitivas: L-DATA.request y L-DATA.indication.
- **Servicio orientado a conexión.**- este es un servicio del tipo circuito virtual en donde se necesita conexión previa al intercambio de mensajes. Las tramas son reconocidos, se realiza control de flujo y recuperación de error. Este servicio es realizado por las siguientes funciones primitivas:  
L-DATA-CONNECT.request, L-DATA-CONNECT.indication,  
L-DATA-CONNECT.confirm,  
L-CONNECT.request, L-CONNECT.confirm, L-CONNECT.indication,  
L-DISCONNECT.request, L-DISCONNECT.indication, L-DISCONNECT.confirm,  
L-RESET.request, L-RESET.indication, L-RESET.confirm,  
L-CONNECTION-FLOWCONTROL.request,  
L-CONNECTION-FLOWCONTROL.indication.

#### PROTOCOLO DE LA CAPA DE ENLACE LOGICO

El formato de la subcapa es presentado en la tabla 2.6 , en él se especifican campos para los puntos de servicio fuente (SSAP) y destino (DSAP), se incluye un campo para datos (DATA) y un campo para control (Control) cuyo objetivo es especificar las funciones del marco: transferencia de información, control de flujo y reconocimiento, y transferencia de información sin conexión.

DSAP	SSAP	Control	DATA
Bytes: 1	1	1	N

Tabla 2.6: Formato de la Subcapa LLC

#### INTERFACE ENTRE LLC Y MAC

La comunicación entre LLC y MAC es efectuada por tres funciones primitivas :

MA-DATA.request, MA-DATA.confirm, MA-DATA.indicate.

## CSMA/CD

Ethernet es una red local del tipo bus desarrollada por Xerox y está siendo apoyada por Digital, Intel y Xerox; es la base para el estándar IEEE 802.3., la siguiente descripción es basada en ref[E1].

El control de acceso al medio de transmisión es distribuido en todas las estaciones y es basado en el algoritmo 1-persistent para tomar decisiones cuando el medio se encuentra ocupado, los siguientes mecanismos son usados en el protocolo:

- Sensado de portadora.- Una estación que desea transmitir un mensaje, primero escucha el canal de comunicaciones y si detecta la presencia de la portadora retrasa la transmisión.
- Detección de colisión.- Es posible que dos o más estaciones detecten que el canal está libre e intenten transmitir al mismo tiempo, lo que ocasionaría una colisión. Las estaciones que transmiten, reciben también la señal del canal y la comparan con el mensaje original, si notan que el mensaje es diferente abortan la transmisión. Cuando una estación detecta colisión envía una señal de refuerzo (jamming) para asegurar que todas las otras estaciones se enteren de que hubo una colisión y aborten su transmisión. El tiempo de colisión (slot) es el tiempo máximo durante el cual una colisión puede ocurrir después de que no hay presencia de portadora, en el peor de los casos, para estaciones que se encuentran en extremos opuestos de la red, es igual a dos veces el tiempo máximo de propagación (450 bits) más la duración de la señal de refuerzo (48 bits). Después de detectar colisiones las estaciones detienen la transmisión y esperan un tiempo aleatorio antes de intentar transmitir de nuevo.
- Tiempos de espera (back off).- Los tiempos de espera son múltiplos del tiempo de colisión y el algoritmo usado para calcularlo se basa en el número de intentos por acceder el medio, el rango es de 0 a  $2^{*K}$  veces el tiempo de colisión en donde K puede tomar el valor de hasta 10, después de 16 colisiones se marca un error.

El formato del mensaje es mostrado en la tabla 2.7 las direcciones tienen una longitud de 48 bits, son únicas y manejadas en hardware.

PREAMBLE	DEST. ADDR	SOURCE ADDR.	TYPE	USER DATA	FCS
Bytes: 8	6	6	2	46 a 1500	4

Tabla 2.7: Formato del Protocolo CSMA/CD

El campo de tipo (type) es reservado para ser usado por protocolos de alto nivel. El campo denominado "preamble" es usado para sincronizar la recepción de mensajes. El campo FCS es usado para enviar un código detector de error. Este método de acceso usa muy eficientemente el medio de transmisión, utilizando el canal hasta en un 90% de su capacidad, sin embargo no debe ser cargado a más de un 50% ya que el tiempo de respuesta del sistema se degrada. Una de las desventajas de este método es que se basa en probabilidades y por lo tanto no se puede asegurar el tiempo máximo de acceso al medio para una estación en particular. Para el caso de carga ligera, la probabilidad de colisiones es comparable con la probabilidad de error por ruido; y ya que el mecanismo de acceso al medio es muy rápido, bajo estas condiciones este método es el mejor.

### Token Passing Bus

El estándar 802.4 ha sido adoptado como el método de acceso al medio para protocolos de redes industriales, forma parte del estándar MAP Manufacturing Automation Protocol. El método TOKEN BUS tiene la ventaja de usar un bus pasivo y de asegurar el acceso al medio en un tiempo determinado, lo que lo hace ideal para aplicaciones en tiempo real.

Las estaciones conectadas al bus forman un anillo lógico, la estación que tiene la ficha (TOKEN) controla el acceso al canal. La ficha es pasada entre estaciones en forma ordenada en el anillo lógico, cada estación debe mantener información de sus estaciones predecesora y sucesora, ya que a diferencia del método TOKEN RING la secuencia en que se pasa la ficha es independiente de la posición física de la estación en el bus.

La estación que mantiene la ficha puede transmitir un mensaje o solicitar la respuesta de alguna estación, actúa como estación maestra por el tiempo en que retiene la ficha. Cuando la estación ha terminado sus transacciones o se ha terminado el tiempo de posesión de la ficha, pasa la ficha a su estación sucesora por medio de un mensaje de transferencia de control de ficha.

Los mecanismos para el manejo de prioridades son parecidos a los que se usan en el método TOKEN RING.

Para que la red tenga mayor funcionalidad se deben incluir las siguientes funciones:

**Alta de una estación.-** Periódicamente se debe brindar la oportunidad a nuevas estaciones para que sean incluidas en la red, esto permite que la red crezca de acuerdo a necesidades futuras.

**Baja de una estación.-** Facilidad para dar de baja una estación, el proceso de baja es iniciado por la estación que desea dejar la red.

**Falla del sucesor.-** En caso de que la estación sucesora falle y no conteste dentro del tiempo de respuesta establecido (RESPONSE WINDOW) esta función encontrará un nuevo sucesor.

**Fichas duplicadas.-** Esta función resuelve el caso en el que la estación que mantiene la ficha, detecta que otra ficha se encuentra en el bus.

**Inicialización.-** Esta función inicializa la operación de la red cuando se pone en operación por primera vez, cuando hay pérdida de ficha y cuando una o más estaciones detectan inactividad por un periodo de tiempo largo.

### Token Passing Ring

En los últimos años esta técnica de acceso al medio ha sido fuertemente apoyada por fabricantes de equipo como IBM, algunas de sus características son el manejo de mensajes de longitud variable y facilidades para el manejo de prioridad en los mensajes; además de ser un método con tiempo de acceso al medio determinístico. La siguiente descripción es basada en ref[16]:

Una ficha (TOKEN) circula alrededor de la red del tipo anillo y permite el acceso al medio, únicamente una estación de la red puede transmitir a la vez. Una estación puede transmitir un mensaje cuando recibe la ficha y ésta viene marcada como libre, la marca como ocupada, la envía y transmite su mensaje. Si la estación no tiene mensaje que transmitir pasa la ficha libre. La estación destino reconoce su dirección en el mensaje y lo copia, envía bits de respuesta. El mensaje con información circula en el anillo hasta que llega a la estación que lo originó, si la estación ya terminó de enviar información (FRAME) lo borra y genera un token libre. Si la estación que envía recibe un mensaje con una dirección fuente diferente que la de ella, es

porque más de un token libre está circulando, bajo esta condición la estación no genera otro token libre. Cuando una estación transmite una ficha libre la siguiente estación en el anillo tiene oportunidad de enviar un mensaje. Conociendo la máxima longitud de los mensajes se calcula el tiempo máximo de acceso a la red.

La estación fuente recibe y borra su propio mensaje de la red; además el mensaje puede contener la respuesta del nodo destino, esto permite al nodo que envía, determinar si el nodo destino está activo o no; si está ocupado; si recibió el mensaje correctamente o si algún error fue detectado por las estaciones conectadas al anillo.

La ficha contiene un indicador de prioridad, una estación con más alta prioridad para transmitir inserta su prioridad en la ficha ocupada, cuando la estación que se encuentra transmitiendo genera una ficha libre, lo hace con la más alta prioridad recibida. Una estación con más baja prioridad no puede reclamar la ficha libre, así circulará hasta que una estación con la misma prioridad la reciba. Cuando no hay más mensaje por transmitir, la prioridad de la ficha es bajada a la anterior.

Una estación es designada como monitor activo y responsable para detectar pérdidas de ficha o circulación continua de fichas ocupadas. La detección de fichas pérdidas la realiza por medio de tiempos máximos de espera (timeouts) dado que se conoce el tiempo máximo en que una ficha libre debe circular por el anillo. Si el tiempo máximo de espera es alcanzado, entonces la estación monitor es responsable de generar un nuevo token libre, este mecanismo también puede ser usado para generar la primer ficha libre al poner en servicio el sistema. La circulación continua de una ficha ocupada es detectada por la estación monitor poniendo un bit en la ficha ocupada a uno, si el monitor ve una ficha con el bit puesto a uno sabe que el mensaje ya viajó alrededor del anillo y que no fue borrado correctamente por la estación fuente. La recuperación de este problema se realiza cambiando la ficha ocupada por una libre. Cualquier estación debe poder realizar las funciones de monitor.

La principal desventaja de este método, es que se requiere un manejo complejo del sistema y que se necesitan mecanismos que puenteen una estación (bypass) cuando se presentan problemas internos al nodo como son la falla de energía eléctrica.

Su principal ventaja es que maneja prioridades y mensajes de longitud variable, los retardos son conocidos y por medio del reporte de errores se puede con relativa facilidad aislar una falla.

#### **Cuadro Comparativo de Protocolos Normalizados**

En la tabla 2.8 se presenta un cuadro comparativo con características de protocolos normalizados, entre éstos se tienen: el protocolo de acceso al medio, restricción sobre la longitud del paquete, si se manejan mensajes con diferentes prioridades, el comportamiento de los nodos, distancias de cobertura y velocidades de transmisión, entre otras.

La característica de complejidad del algoritmo es evaluada realizando un modelo del protocolo y simulándolo por medio de un programa; así un algoritmo de complejidad simple es el que necesita menos líneas de código para simularse, el de complejidad alta es el que requiere mayor número de líneas de código ver ref. A34].

	CSMA/CD	TOKEN RING	TOKEN BUS
ACCESO AL MEDIO	Contención	Determinístico	Determinístico
LONG. PAQUETE	Mayor a 2 T. Prop.	Cualquiera	Cualquiera
MENSAJES PRIORIDAD	no	si	si
NODOS	Pasivo	Activo	Pasivo
DIS. CUBIERTA	Menor 2.5 km	Menor 10 Km	Menor 10 Km
VEL. TRANS.	Menor 10 Mbs	Menor 50 Mbs	Menor 50 Mbs
<b>VENTAJAS</b>			
Algoritmo	Simple	Complejo	Muy complejo
Respuesta	Excelente carga baja	Ex. media y alta	Ex. media y alta
<b>DESVENTAJAS</b>			
	Diag. de Fallas	Mant. de FICHA	Mant. de Ficha
	Paq. long. mínima	Mecanismo de Bypass	Alg. Complejo

Tabla 2.8: Cuadro Comparativo de Protocolos Normalizados

### 2.3.3 Protocolos para Redes Industriales

#### Manufacturing Automation Protocol:MAP

Para lograr una completa automatización de plantas industriales, se propone el uso de sistemas de comunicación que abarquen desde el nivel de sensores y actuadores hasta el inventario del producto y refacciones. En la figura 2.2 se presenta un sistema de comunicación para la automatización de plantas basado en el estándar MAP.

La siguiente descripción es basada en ref.[A14]:

El nivel más alto está constituido por una red de banda ancha, multicanal y una frecuencia de operación de 10 Mbits/seg. Su propósito es comunicar grandes paquetes de información de varios tipos, con canales para control, gráficos, video, audio, etc. A este nivel se usa el modelo OSI completo de 7 capas.

La red principal se conecta al siguiente nivel (célula) por medio de unidades denominadas gateways, en donde se usan redes de banda base de un solo canal y a frecuencias de 5 Mbits/seg para aplicaciones en tiempo real, de alta velocidad y control. Estas redes constituyen el segundo escalón de la arquitectura MAP y consisten en una simplificación del modelo, en el que se han comprimido diferentes funcionalidades del software de comunicación con el objeto de hacerlo más rápido para aplicaciones críticas en tiempo (se suprimen las capas 3 a 6 del modelo OSI) y se instala el modelo de aplicación inmediatamente después del nivel de enlace de datos. A este nivel de comunicación se le conoce como MINIMAP y es adecuado para interconectar autómatas programables o controladores de procesos de varios lazos de control. En el nivel más bajo de la jerarquía (campo), donde puede haber cientos de elementos sencillos de entrada/salida (analógicos y digitales), conectados a largas distancias (por ejemplo, los buses de entrada/salida de autómatas programables), se considera que la red MINIMAP no es adecuada. Los motivos que se argumentan tienen que ver con el precio de una conexión MINIMAP para un elemento muy simple y otras relacionadas con la funcionalidad del nivel de aplicación (se considera que el nivel de aplicación MAP sigue siendo excesivamente complejo para las necesidades de éstos elementos). Este tipo de elementos se denominan comúnmente elementos de campo y el sistema de comunicación correspondiente se ha definido como bus de campo (Field Bus). Un bus de campo tiene que ser una solución de bajo costo, en tiempo



CAPITULO 2. SISTEMAS DISTRIBUIDOS

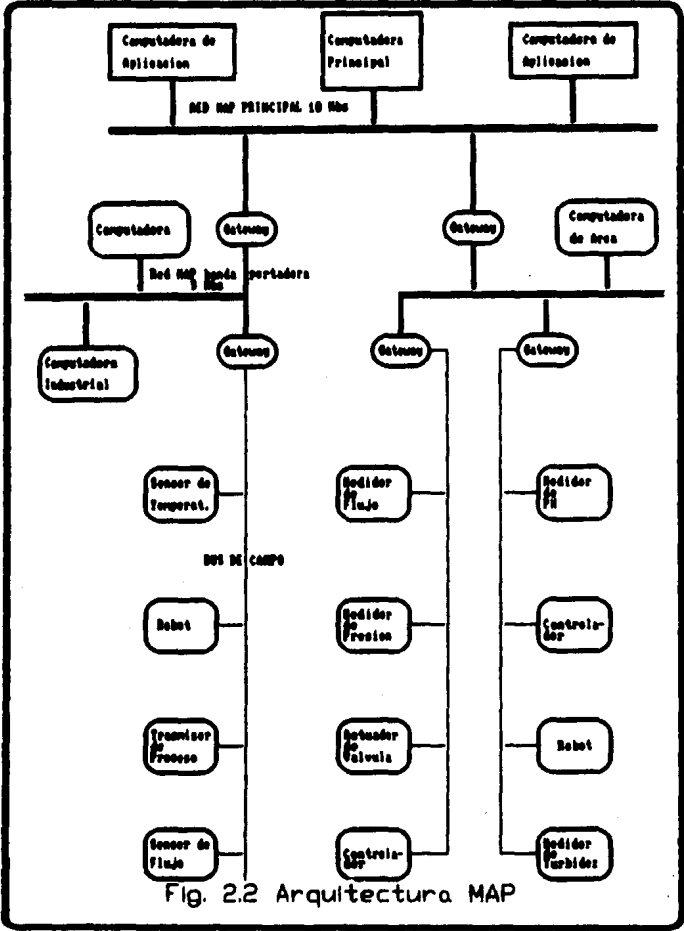


Fig. 2.2 Arquitectura MAP

real, con transmisión serie basada en bits, sobre un bus digital de datos con capacidad para interconectar controladores con todo el espectro de dispositivos de entrada/salida. Estos incluyen no sólo sensores, transmisores, interruptores y actuadores sencillos sino también controladores esclavos inteligentes de uno a cuatro lazos. El bus de campo es una parte esencial en un entorno de proceso o fabricación, sin el cuál las redes locales de alto nivel como MAP quedan incompletas.

#### Características Generales de Algunos Buses de Campo

- Capacidad de estaciones interconectadas (30)
- Todos los diseñadores de buses de campo adoptan la estructura y la nomenclatura del modelo OSI y están de acuerdo en que debe de ser una estructura de tres niveles (1,2 y 7 del modelo OSI). Algunos han optado por una arquitectura muy próxima a MINIMAP, lo que les facilitará el enlace a MAP (lo que es un requerimiento adoptado por todos los grupos de trabajo). La siguiente descripción es basada en ref[A14]:
- Niveles de aplicación: protocolos, servicios, estructuras de datos e interfaces de usuario para instrumentación inteligente. Algunos de los grupos poseen especificaciones e implementaciones de este nivel (FIP, Rosemount, Era) en tanto que otras lo están desarrollando actualmente (Profibus, Foxboro). Por ejemplo, el nivel de aplicación presentado por FIP Manufacturing Periodic/Aperiodic Services (MPS) ofrece una gran cantidad de servicios al usuario.
- Nivel de enlace de datos: los dos métodos de acceso al medio más usados son maestro/esclavo y maestro múltiple con paso de testigo (token passing). Se insiste mucho en el concepto de integridad en los datos, referidos al aspecto de detección de errores, y están de acuerdo en que se debe cumplir una condición mínima, menos de un mensaje erróneo sin detectar en 20 años de operación, lo que supone la utilización de un código CRC polinomial. El protocolo de control de enlace lógico ofrece algunas variantes, como es el uso del protocolo HDLC extendido y el estándar IEEE 802.4. Otro tema que se discute en éste nivel es el tema de seguridad de comunicación (Servicio confirmado frente al servicio no confirmado) Esto quiere decir que si se utiliza un servicio confirmado, se impide la posibilidad de broadcast es decir, transmisión simultánea de un mensaje a todas las estaciones, pero se gana en fiabilidad en las comunicaciones, pues se tiene la certeza de que el mensaje se ha recibido correctamente por el destinatario. Si se usa un servicio no confirmado, la confirmación debe efectuarse en el nivel de aplicación (perdiendo velocidad).
- Redundancia. La redundancia del nivel físico está supuesta así como la posibilidad de maestro redundante en los sistemas (maestro/esclavo) pero no así cuando se habla de otros tipos de redundancia referidos a aspectos de aplicación (base de datos, p.e.).
- Nivel físico. Salvo la opción de transmisión orientado a byte de Profibus todo el resto de las propuestas utilizan transmisión orientada a bit con codificación Manchester bifase o por modulación de frecuencia.

## Capítulo 3

# SISTEMAS DE CONTROL DISTRIBUIDO

### 3.1 Introducción A SDCD

#### 3.1.1 Generalidades

Los sistemas de control distribuido basados en el procesamiento digital de las señales han surgido como una herramienta necesaria en la supervisión y control de procesos industriales. En la actualidad debido al gran desarrollo en el diseño de dispositivos microcomputarizados, surgen los sistemas de control distribuido, formados por módulos inteligentes (controladores), que efectúan funciones (algoritmos de control) y que conectados a una red de comunicaciones efectúan todas las funciones que un proceso requiere para funcionar en forma óptima, confiable y segura. Plantas manufactureras modernas han desarrollado líneas jerárquicas de producción, que inician en el nivel de sensores y actuadores y continúan en módulos de control directo (controladores) y terminan formando un sistema de control de producción. Un sistema de control distribuido, es un sistema de control que es dividido en bloques funcionales e independientes, los cuales son ubicados en diferentes puntos del proceso y que son interconectados por una red de comunicaciones. Las funciones principales que realiza el sistema son:

- Obtención de información del proceso (ADQUISICION).
- Regulación de las principales variables del proceso (CONTROL).
- Supervisión del funcionamiento global de la planta.

En la figura 3.1 se muestra un sistema de control distribuido, en el que se distinguen los siguientes módulos:

**ADQUISICION DE DATOS.** El objetivo de este módulo es obtener información del proceso, que permita conocer el estado funcional de la planta. Señales analógicas y digitales provenientes de puntos clave del proceso son monitoreadas. Las señales analógicas como temperaturas, presiones y flujos, por su naturaleza dinámica en general son muestreadas y digitalizadas, a razón de 10 veces por segundo. Las señales son filtradas y comparadas contra límites establecidos, y finalmente convertidas a unidades de ingeniería para ser almacenadas en una base de datos y posteriormente formar parte de algún tipo de presentación audiovisual (alarmas, reportes, gráficas o diagramas, p.e).

Las señales digitales provenientes de interruptores y relevadores son muestreadas generalmente una vez por segundo, para detectar si hay cambios en su estado de funcionamiento, si lo

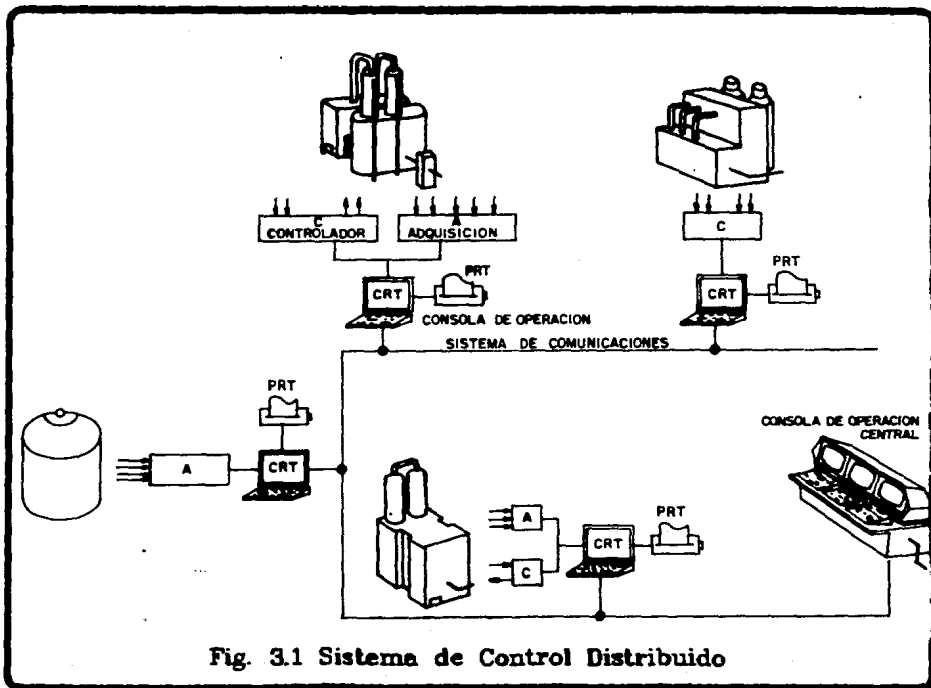


Fig. 3.1 Sistema de Control Distribuido

hay, son almacenadas en la base de datos, para posteriormente ser mostradas en algún tipo de presentación audiovisual. Las señales adquiridas son enviadas a un sistema de procesamiento, generalmente formado por una computadora (mainframe) y procesadas para realizar análisis funcional y estadístico.

**CONTROL DE VARIABLES DEL PROCESO.** El control involucra la medición de variables del proceso, puntos de ajuste y algoritmos de control que realizan cálculos para manejar variables de entrada al proceso y mantener las variables del proceso en valores óptimos. Los algoritmos de control varían considerablemente en complejidad y dependen de las características dinámicas del proceso. Consecuentemente los controladores deben permitir el almacenamiento de los principales algoritmos de control y selección de uno de ellos en forma local o remota. Los controladores son dispositivos basados en microprocesadores, que periódicamente ejecutan los algoritmos de control (en general varias veces por segundo).

**CONSOLA DEL OPERADOR.** En todos los sistemas se cuenta con una o varias consolas de operador, las cuales tienen capacidad de acceder las variables de la base de datos y presentarlas en diferentes formatos, también se tiene la facilidad de modificar operaciones de control como son cambiar el punto de ajuste de la variable, modificar algún parámetro del algoritmo de control o modificar el algoritmo de control. Otras funciones incluyen el despliegue de condiciones de alarma y otras permiten examinar comportamientos de variables dentro del proceso (historia de variables).

**SISTEMA SUPERVISORIO.** Los sistemas modernos de control están organizados en forma jerárquica con las funciones críticas que requieren una pronta respuesta en el nivel más bajo y en el nivel más alto funciones más complejas (optimización). La adquisición de datos y el control directo se encuentran en el primer nivel de funciones de control, niveles superiores incluyen la supervisión del funcionamiento de la planta, administración y optimización de recursos. Las funciones del primer nivel radican en módulos microcomputarizados y las funciones de niveles superiores se realizan en computadoras de mayor capacidad (mini y maincomputadoras).

**SISTEMA DE COMUNICACIONES.** La transmisión de información entre los diferentes componentes del sistema se realiza en general a través de un cable coaxial o fibra óptica. La red es capaz de aceptar diferentes módulos que incluyen: controladores, unidades de adquisición de datos, consolas, computadoras y otros módulos de aplicación específica. Todos los módulos conectados a la red están sujetos a un protocolo de comunicaciones que permite el intercambio de información, define prioridades, verifica los mensajes y detecta errores y en caso de falla envía un mensaje al operador.

**VENTAJAS.** Los sistemas de control distribuidos ofrecen varias ventajas dentro de las cuales se tienen:

- **Flexibilidad.** El control analógico convencional ejecuta algoritmos de control de acuerdo a un diseño específico, si se requiere cambiar la estrategia de control, hay que cambiar el módulo con el consiguiente incremento en el costo. Por otro lado los sistemas distribuidos aprovechan el desarrollo de la tecnología de microprocesadores y redes locales. Los algoritmos de control más comunes son programados en el controlador. Para seleccionar un algoritmo de control, se programa el controlador por medio de un teclado o consola del operador; a esta actividad se le conoce como configuración.
- **Presentación de la información.** Una de las ventajas más sobresalientes de los sistemas de control distribuido es el uso de pantallas gráficas de color y alta resolución, así como a la importancia que se da a la relación hombre-máquina. La filosofía de control usada en la mayoría de sistemas es el monitoreo de las variables por excepción. Varias formas

de presentación son disponibles, las que permiten operar grandes sistemas monitoreando sólo la información necesaria. El operador puede situarse en cualquier punto del proceso a base de selección de menús y pasar de sistemas del proceso a subsistemas y de ahí a grupos y finalmente a variables.

- **Costo.**-El costo de un sistema de control distribuido se ve notablemente reducido al instalar el equipo de monitoreo en diferentes puntos del proceso evita el llevar por medio de alambre las señales de campo hasta un cuarto de control.
- **Confiabilidad.**-Es importante notar que tanto la distribución del control por funciones como la localización física es parte del concepto de control distribuido, pero la distribución del riesgo es también importante. Lo más ventajoso sería poder tener un controlador por variable así al fallar el controlador sólo una variable de control quedaría fuera de servicio. En la mayoría de sistemas se agrupan varios lazos en un controlador de tal manera que al fallar uno de éstos, quedan fuera de servicio varios lazos. Para evitar estos problemas en lazos críticos se instalan controladores redundantes, así al fallar uno entra en funcionamiento el de respaldo, con una pérdida mínima de información y una recuperación funcional total.

### 3.1.2 Control Distribuido Jerárquico

El control de procesos por computadora de sistemas tan complejos como las plantas industriales, se organiza en forma jerárquica, en donde se tienen varios niveles de control, que van desde el control directo hasta el control de producción. El proceso industrial a controlar es dividido en sistemas formados por lazos de control, en donde cada lazo recibe señal de un sensor y regula la variable de proceso por medio de un actuador.

#### Nivel 1 Control Directo

El control directo es el que está ligado en campo a las variables de proceso y consiste en lazos simples de control, en donde se tienen dos entradas y una salida. El control directo es efectuado por un módulo basado en microprocesadores, en donde se ejecuta un algoritmo de control que la mayoría de las veces reside en memoria. Los tiempos de toma de decisión en el control directo son críticos y requieren de tiempos de muestreo altos.

#### Nivel 2 Control Supervisorio

Este nivel de control está encargado de coordinar varios lazos de control y se asocia a sistemas específicos de la planta ( caldera, turbina, y generador, p.e. ). La coordinación del proceso la realiza un operador de estación en función de la información que le es presentada de cada lazo de control. En este nivel se requiere una consola de operación que tenga comunicación con los diferentes lazos de control del sistema y que permita realizar cambios en cada lazo que van desde modificación de puntos de ajuste hasta algoritmos de control.

#### Nivel 3 Control de Producción

Este nivel del sistema de control está encargado de optimizar y organizar la operación de la planta. En este nivel se realizan optimizaciones, balances de material y energía; se establecen condiciones de operación y control y se imponen condiciones que han de ser realizadas por el control supervisorio.

#### Nivel 4 Información Gerencial

Este nivel se encarga del manejo de información relacionada con material en existencia, razones de producción, programas de mantenimiento y planes de producción. Este nivel es más administrativo que de control.

La relación entre los diferentes niveles de control es mostrada en la figura 3.2.

#### 3.1.3 Instrumentación y Control de Centrales Termoeléctricas

En este punto será descrito la manera en cómo es organizado el sistema de instrumentación, control y automatización (ICA) de Centrales Termoeléctricas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). La siguiente descripción es basada en la especificación J-100 ref[R4] para la adquisición de equipo de instrumentación y control de Centrales Termoeléctricas Normalizadas de 160 y 350 Megawatts. El sistema ICA comprende todos los dispositivos, instrumentos, controladores, equipo, tableros, gabinetes, cableado y accesorios necesarios para cumplir las siguientes funciones:

- El arranque y paro de una unidad generadora, en forma ordenada, así como la generación de energía eléctrica en forma segura y económica.
- Mantener la planta durante todas las variaciones de carga, incluso en las ocasiones de falla, en forma estable y segura tomando en consideración la interrelación de todos los componentes de la planta.

El sistema ICA debe estar organizado en una forma jerárquica para la toma de decisiones, siendo los principales componentes:

- Cuarto de control.- Desde donde se deberá poder supervisar y controlar la operación de la unidad.
- Medición.- Módulo formado por sensores, transmisores y convertidores cuya función es obtener las señales de campo para el sistema ICA.
- Control analógico.- Módulo para regular las principales variables del proceso.
- Control lógico.- Módulo encargado del arranque automático y paro de equipos.
- Sistema de alarmas.- Este módulo tiene como función el presentar fallas mediante una señal luminosa y una señal audible, con el objeto de conocer y localizar las fallas rápidamente.
- Sistema de adquisición de datos.- Este módulo es el encargado del monitoreo de las distintas variables analógicas y digitales de la planta. Las funciones que realiza son:

- Avisar al operador de alarmas individuales.
- Auxiliar al operador en el arranque o paro de grupos, subgrupos o accionamientos.
- Llevar el registro de tendencias de las variables que solicite el operador.
- Facilitar la supervisión del proceso por medio de las diferentes funciones de despliegue de información relacionada con variables del proceso.

La arquitectura que se propone en la especificación J-100 es la de un sistema jerárquico centralizado. Es jerárquica ya que es organizada por niveles, los niveles superiores controlan y supervisan los niveles que se encuentran abajo; conforme se va descendiendo en la jerarquía se llega al nivel más bajo que está formado por lazos de control simple. Es centralizado ya que todo el equipo de control

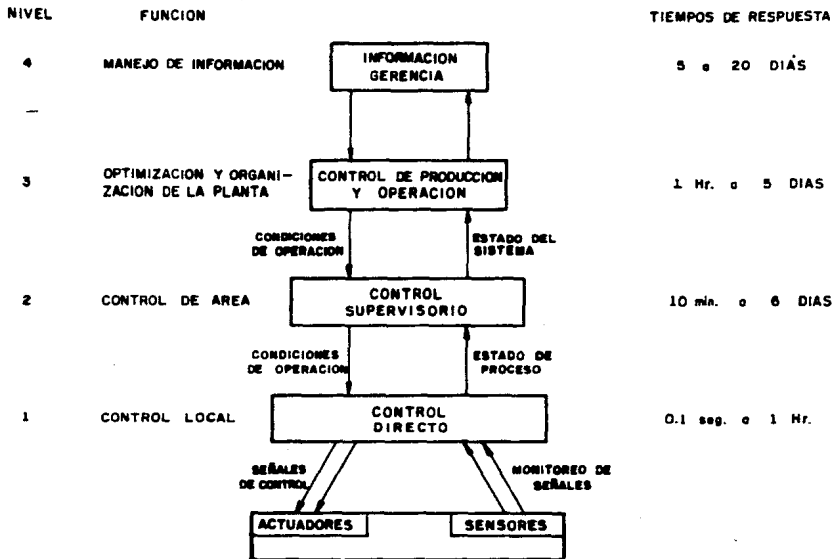


Fig. 3.2 Niveles de Control de un SDCU



y automatización es instalado en un cuarto de control central, hasta donde se hacen llegar todas las señales de campo.

### 3.2 Usuarios del SDCD

En esta sección se describe quiénes serán los usuarios del SDCD para Centrales Termoelectricas, cuales son sus funciones y de qué manera las realizarán auxiliándose del SDCD, ref[R5].

- **Operador del proceso.**- Su tarea fundamental será la de mantener operando en condiciones preestablecidas los procesos bajo su cargo. Para realizar su tarea el operador debe poder supervisar el proceso a su cargo y realizar acciones sobre los elementos manipulables del mismo, así como informar de sucesos y acciones relevantes.  
En el SDCD la supervisión y control las realizará el operador por medio de una estación de operación, por medio de ésta consultará en pantalla las diferentes funciones de despliegue y ajuste de parámetros relacionados con el proceso a su cargo; además la estación tendrá asociados dispositivos periféricos que le permitirán imprimir reportes así como almacenar información asociada a las variables que esté monitoreando.
- **Ingeniero de proceso.**- Su tarea es mantener operando de la mejor manera la planta, por lo que debe poder supervisar completamente la planta y establecer directrices inmediatas sobre el manejo de equipo y manipulación de los elementos de control, mismas que deben seguir los operadores de la planta.  
En el SDCD la supervisión y control de la planta la realizará el ingeniero por medio de una estación de cómputo dedicada, misma que le permitirá acceder información de todo el sistema, así como la supervisión de estaciones de operación.
- **Ingeniero instrumentista.**- Tiene como funciones mantener la instrumentación, el equipo y los algoritmos de control operando. Cuando se trata de equipo sus funciones las realiza en campo directamente y si es programación o ajuste de controladores lo realiza por medio de estaciones locales de los controladores o estaciones de operación.  
En el SDCD realizará las modificaciones a algoritmos por medio de las consolas de operación, en las que tendrá acceso a información que no es accesible al operador ni al ingeniero de proceso.
- **Jefe de laboratorio.**- Tiene como funciones el supervisar el estado que guardan las variables químicas del agua y vapor del ciclo y del estado de los equipos auxiliares de dosificación y almacenamiento de productos químicos. Sus funciones las realiza por medio de una consola de operación desde donde tiene acceso a las diferentes funciones de despliegue. Sólo tiene acceso a variables relacionadas con el laboratorio químico.
- **Ingeniero de sistemas.**- Su función es mantener operando los subsistemas de procesamiento y computación del sistema de control distribuido como son sistemas operativos, tareas, puertos de comunicación y equipos electrónicos asociados al sistema. En el SDCD el ingeniero de sistemas realizará sus funciones por medio de una estación de operación en donde consultará los estados funcionales de equipos, tales como, controladores, equipo de comunicación, estaciones y equipos periféricos.
- **El superintendente.**- Su función es de programar la producción de las diferentes unidades de la planta a corto, mediano y largo plazo de acuerdo a las políticas de producción; lograr que la producción sea la que se demanda tanto en calidad como en cantidad, tomando en cuenta las restricciones sobre el consumo de energía y materia disponible, así como de los recursos disponibles.

En el SDCD el superintendente realizará sus funciones por medio de una estación de operación desde donde tendrá acceso a la información de los demás usuarios así como a información exclusiva para él. La estación debe permitirle realizar cálculos puntuales y estadísticos de producción, consumo y eficiencia.

### 3.3 Tareas Principales

El SDCD estará constituido por un conjunto de tareas que serán ejecutadas en cada uno de los elementos inteligentes del sistema, ref[R5].

A continuación se describirán las principales tareas haciendo una descripción de su función y caracterizándolas con parámetros que definan su importancia.

- **CONTROL ANALOGICO.-** La función de esta tarea es mantener las variables más importantes del proceso en su punto de ajuste para maximizar seguridad y eficiencia en la operación de la planta.
  - Dimensiones.- El sistema deberá contemplar el manejo de mensajes asociados a 150 lazos simples (150 entradas y 100 salidas) de control analógico.
  - Tipo de tarea.- Permanente y residente en un módulo dedicado.
  - Tiempos de muestreo.- Los algoritmos de control son ejecutados en forma periódica en tiempos múltiples de un periodo T, que tiene una duración de 250 milisegundos.
  - Carga.- Fuente del 15% del tráfico de mensajes, ref[A28].
  - Flujo de información.- De módulos de control a estaciones de operación.
  - Usa el sistema de comunicaciones para:
    - Transmisión periódica de:
      - variables de control a estaciones de operación.
      - estados funcional, operativo y de alarmas a estaciones de operación.
      - variables de control y error al módulo de historia.
    - Recepción de algoritmos de control(estructuras de control).
    - Recepción de parámetros de sintonización de algoritmos de control(ganancias, puntos de ajuste) y modos de control(manual o automático), cambiar puntos de ajuste en modo automático.
    - Recepción de bases de datos asociadas con la asignación de controladores y canales de campo, rangos de validación y límites de alarma.
- **CONTROL LOGICO.-** Este módulo tiene la función de posibilitar el arranque o paro y la operación de los equipos de la planta de acuerdo con los requerimientos operativos de la misma.
  - Dimensiones.- El sistema deberá tener la capacidad para manejar 1500 entradas digitales y 100 salidas digitales asociadas a esta tarea.
  - Flujo de información.- De módulos de control lógico a estaciones de operación.
  - Tipo de tarea.- Residente y permanente en un módulo dedicado, las tareas de control lógico y control analógico pueden ser realizadas por el mismo equipo.
  - Tiempos de muestreo/ 1000 contactos = 5 ms/k
  - Capacidad por módulo.- 64 entradas/salidas programables.
  - Usa el sistema de comunicaciones para:

Transmisión periódica de:  
variables lógicas a estaciones de operación.  
estado funcional, estado operativo y alarmas

Recepción de bases de datos asociadas con la asignación de controladores y algoritmos de control. Recepción de comandos de: arranque y paro de equipo y modificación de modos de operación.

- **ADQUISICION.-** Este módulo se encarga de la adquisición de señales de campo y de su procesamiento (acondicionamiento, filtrado, conversión analógico digital, validación y linealización).  
Dimensiones.- El sistema deberá contemplar el manejo de mensajes asociados a 1000 señales binarias, 100 señales binarias con estampa de tiempo y 500 señales analógicas, ref[R5].  
Tipo de tarea.- residente y permanente en un módulo dedicado.  
Tiempos de muestreo.- 10 veces por segundo.  
Flujo de información.- De módulos de adquisición a estaciones de operación.  
Carga.- Fuente del 75% del tráfico de mensajes, ref[A28].  
Usa el sistema de comunicaciones para:  
Transmisión periódica de:  
variables de adquisición a estaciones de operación.  
estado funcional y operativo de señales adquiridas.  
Recepción de:  
información asociada a base de datos  
configuración de la unidad de adquisición.  
rangos de validación.  
activación de tareas de adquisición.
- **ALARMAS.-** La función de alarmas es advertir al operador y al ingeniero de la existencia de condiciones anormales de proceso o de equipo.  
Tipo de tarea.- Tarea residente en cada módulo controlador o de adquisición.  
Tiempo de respuesta.- El tiempo en que la detección de una alarma se lleve a cabo deberá ser menor que el ciclo de adquisición, de manera que no se pierda ningún cambio de estado.  
Transmisión aperiódica de:  
Estados de alarma  
Recepción de:  
información asociada a la base de datos.  
activación de la tarea de alarmas.
- **MONITOR SECUENCIA DE EVENTOS.-** Este módulo se encarga de la detección y registro a alta velocidad de los eventos (cambios de estado) que tengan lugar en los sistemas de protección de la planta, a partir de la detección de alguna condición, por ejemplo una falla, con lo cual se tiene un registro cronológico de variables que permite analizar los eventos y sus secuencias, determinando así las causas posibles de la falla. Puede ser incluida en adquisición binaria sin embargo debido a la dinámica tan rápida de dichos eventos obliga a considerar este módulo como un módulo dedicado.  
Dimensiones.- El sistema deberá contemplar el manejo de mensajes asociados a 100

señales del monitor secuencia de eventos.

Tipo de tarea.- Residente y permanente en un módulo dedicado.

Tiempo de muestreo.- 100 veces por segundo, ref[R4]

Flujo de información .- De módulos de adquisición a estaciones de operación.

Transmisión aperiódica de eventos.

Recepción de:

información asociada a la base de datos.

activación de la tarea.

- **HISTORIA.-** Este módulo es de carácter general: ya que sirve para registrar el comportamiento de las variables adquiridas y calculadas a través del tiempo, información del sistema que se genera por todos los dispositivos conectados a la red de comunicaciones, así como el estado y algunos datos de operación de dichos dispositivos . Los tipos de datos almacenados incluyen historia de procesos continuos, de procesos por lote, de eventos, bases de datos del equipo del SDCD, archivos generales y programas de análisis.

## Capítulo 4

# ESPECIFICACION DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES

En este capítulo se especificarán las necesidades de transferencia de información entre los diferentes componentes de un sistema de control distribuido (SDCD) orientado a centrales termoelectricas.

### 4.1 Requerimientos de Transferencia de Información

En este punto se tratarán los diferentes tipos de información que se necesitan transferir entre tareas del SDCD.

Los tipos de información transferida por un sistema de comunicaciones entre tareas consiste de bits, caracteres y estructuras de datos entre otros y la interpretación de la información depende de la aplicación. La información entre tareas es transferida en forma de mensajes, definiéndose un mensaje como una unidad lógica de información transferida entre tareas de aplicación. Los tipos de mensaje se pueden definir en función de :

- Tiempos de respuesta.- Qué tan rápido el mensaje deberá ser transferido.
- Longitud.- La cantidad de información a ser transferida.
- Confiabilidad.- La importancia de que el mensaje esté libre de errores y la garantía que llegue a su destino.
- Frecuencia.- Qué tan frecuentemente la tarea de aplicación envía el mensaje.
- Prioridad.- Este parámetro define qué tan importantes son los mensajes generados. Se manejarán al menos dos prioridades denominadas alta y baja.

#### 4.1.1 Tipos de Mensajes

Los diferentes tipos de mensajes que se requieren en un SDCD son:

- Comando/Respuesta.- Un comando es un mensaje enviado de una tarea a otra (por ejemplo de un controlador a un sensor o actuador) solicitando una acción a ser realizada. La respuesta es la contestación a un comando y puede consistir en la confirmación de que la acción ha sido efectuada o bien la información pedida. Los dos tipos de mensajes son cortos, 30 bytes ref[A28]. La mayoría de los mensajes entre tareas son de este tipo. Este tipo de mensajes causan un cambio de estado en el proceso físico a controlar, generalmente son solicitudes de un elemento de control a otra, para que éste tome algunas acciones. Cuando la acción pedida por el comando toma un tiempo considerable se

generan dos respuestas: una en forma inmediata de reconocimiento al comando y otra una vez que se ha realizado la acción pedida ( respuesta de acción concluida), con lo que se forma una secuencia Comando-respuesta inmediata-respuesta retardada.

Este tipo de transacciones tienen relaciones de una tarea fuente a una destino, sin embargo la tarea destino puede aceptar transacciones de más de un fuente.

- Registro de información.- Este tipo de mensajes son enviados por una tarea a otra para informarla del estado que guardan las variables del proceso. La información es usada para realizar control supervisorio, presentación a operadores o almacenamiento en base de datos, entre otros. Una tarea envía mensajes de registro de información bajo tres circunstancias: periódicamente, al ocurrir un evento o por petición. Los mensajes son multidestino, en el sentido de que una tarea puede enviar información a más de una tarea al mismo tiempo. En general para este tipo de mensajes pueden ser tolerados retardos más grandes en el sistema de comunicación, adicionalmente si la información es para actualización periódica de algún tipo de despliegue, la pérdida del mensaje no es crítica.

Este tipo de comandos son más largos que los mensajes de comandos y respuestas, otra característica es que tienen la más baja prioridad para ser transmitidos.

- Alarmas.- Son mensajes enviados de un controlador a una estación de operación para indicar que ha ocurrido una condición de funcionamiento anormal en el sistema. Este tipo de mensajes indican una situación peligrosa en la planta y por lo tanto requieren de tiempos de respuesta cortos y una alta confiabilidad, las longitudes de estos mensajes son cortas aprox. de 8 bytes ref[A28].

Los mensajes de alarma son similares a los de registro de eventos, con la diferencia que los de alarmas requieren el menor retardo posible en la comunicación.

Los tiempos de respuesta que deben ofrecer los sistemas de comunicaciones son fijados por los requerimientos de tiempo de respuesta a los mensajes de alarmas.

- Sincronización.- Son mensajes que indican una acción de sincronización entre dos o más tareas de aplicación o bien la sincronización de bases de tiempo. El intervalo de tiempo en el cual la sincronización pueda ser alcanzada depende del tiempo de respuesta de comunicación y debe por lo tanto ser muy corto, la longitud del mensaje es tan corta como la de alarmas.
- Archivos.- En algunas aplicaciones se puede requerir el envío de archivos, sin embargo, en sistemas de control ésta rara vez sucede.
- Programas.- Para muchas aplicaciones de control, no es práctico almacenar todos los programas de aplicación en la memoria de la computadora en donde van a ser ejecutados. Se ha generalizado el uso de módulos de control configurables en donde el hardware puede ser el mismo para diferentes aplicaciones no así los programas, que pueden ser seleccionados de un conjunto grande (50). Los programas son grandes y pueden ser transferidos en varios mensajes, en este tipo de mensajes el tiempo de respuesta no es importante, además en la mayoría de las veces los controladores o unidades de adquisición son configuradas fuera de línea para después integrarse a la red.

**Los principales mensajes de un SDCD son del tipo Comando-Respuesta, Alarmas y Registro de información.**

#### 4.1.2 Cantidades de Información

La longitud del mensaje a transmitir es un parámetro clave en el sistema de comunicaciones, ya que a una velocidad de transmisión determinan el tiempo de uso del medio de comunicaciones. Para los SDCD en función de la cantidad de información a transmitir, se requieren dos tipos de mensaje:

- Mensajes largos.- este tipo de mensajes está orientado al envío de grandes cantidades de información y es usado para transferencia masiva de datos y para envío de programas a controladores. Para el caso de carga de programas desde la consola de operación es importante transferir la información en forma confiable, pero no es tan importante el tiempo de transferencia en comparación con los tiempos de respuestas de mensajes de alarma o adquisición periódica. La manera de transferir estos mensajes es dividiéndolos en bloques de longitud constante. La longitud de partición se establece de manera que no interfiera en los tiempos de respuesta de mensajes de más alta prioridad.
- Mensajes cortos.- son mensajes de longitud variable y corta, este tipo de mensajes está orientado al envío de alarmas, comandos y respuestas, sincronización y solicitud de servicios. Se selecciona una longitud máxima de tal manera que los mensajes puedan ser enviados en una sola transacción. Se requiere alta confiabilidad en el envío de estos mensajes, además este tipo de mensajes aparecen con mayor frecuencia en el sistema.

#### 4.1.3 Flujos de Información

El flujo de información es determinado por las relaciones lógicas entre tareas de aplicación y la forma en que las tareas cambian con el tiempo.

El flujo de información junto con las razones de transferencia definen los requerimientos para la topología de la red. Las trayectorias de información se ven fuertemente influenciadas por:

- Naturaleza estática o dinámica de la aplicación. Por ejemplo el número de veces que se realizan configuraciones de equipo en la planta.
- Las características del lenguaje y sistemas operativos, que deben ser usados para implementar el SDCD, por ejemplo, el número de tareas que pueden ser creadas en forma dinámica y cuáles de ellas pueden migrar de una estación a otra.
- Las primitivas de comunicación proporcionadas por el sistema de comunicaciones, por ejemplo primitivas basadas en memoria compartida, envío de mensajes o llamadas a procedimientos. La mayoría de las relaciones en un SDCD son estáticas. Una planta permanece sin cambios por períodos de meses o años. Para el SDCD se requieren dos flujos de información:
  - Uno a uno.- Un mensaje es enviado de una tarea a otra.
  - Uno a muchos.- Un mensaje es enviado de una tarea a muchas.

#### 4.1.4 Nombres y Direcciones

Para que una tarea se comunique debe ser posible identificarla en forma única dentro del sistema. La identificación se realiza por medio de nombres que representan identificadores lógicos y por direcciones que representan identificadores físicos. Los nombres son traducidos a direcciones para poder ser usados en el sistema de comunicaciones. El nombre es usado a nivel tarea de aplicación y la dirección a nivel controlador de comunicaciones. Para un SDCD se requieren al menos dos niveles de direccionamiento, a nivel nodo y dentro del nodo las tareas.

#### 4.1.5 Tiempos de Respuesta

El tiempo de respuesta entre mensajes de un SDCD es un parámetro clave del sistema de comunicaciones, es definido como el tiempo desde que una tarea solicita a otra tarea que efectúe una acción hasta el tiempo en que recibe una respuesta. Este tiempo incluye el tiempo de transferencia del mensaje, el retardo debido al medio y el tiempo de procesamiento de la tarea que recibe el mensaje. Los requerimientos de tiempos de respuesta son determinados por las características de la planta a ser controlada, en condiciones normales y anormales. Bajo condiciones normales el sistema de comunicaciones es usado para transferir información de variables de proceso de la planta. El tiempo de muestreo de las variables es realizado en función de las frecuencias de las señales y su contenido armónico.

*" Una señal continua limitada en banda cuyo contenido armónico no es mayor que una frecuencia  $f_{max}$  es representada por sus muestras tomadas a intervalos menores o iguales a  $1/2f_{max}$  " ver Teorema de Nyquist ref[L9].*

El tiempo de respuesta del sistema se establece en función del tiempo de muestreo y el período de refrescamiento en pantalla. Bajo condiciones anormales de operación se realiza el envío de mensajes de alarmas y se requiere que estos mensajes sean manejados en tiempos de respuesta cortos (1/10 del periodo de muestreo fundamental). Esto se logra dando mayor prioridad a este tipo de mensajes, de tal manera que en una cola de mensajes de un nodo se dé preferencia al envío de mensajes de alarmas y acciones correctivas. Para satisfacer los tiempos de respuesta, el envío de mensajes, en sistemas de acceso al medio por encuesta, es organizado en función de un ciclo de trabajo, el cual es definido como el tiempo entre accesos al medio de un nodo para el peor caso de carga. Si hablamos de un ciclo de trabajo de un segundo se entiende que el sistema de comunicaciones permite el acceso al uso del medio a todos los nodos en un segundo bajo máxima carga.

#### 4.1.6 Disponibilidad

La disponibilidad de un sistema para un período T se define como el tiempo t en que opera satisfactoriamente el sistema entre el tiempo T.

La disponibilidad de un sistema está compuesta de dos factores: confiabilidad, la cual es expresada como el tiempo promedio entre fallas (TPEF) y mantenibilidad, la cual es expresada como el tiempo promedio para reparar una falla (TPRF).

$$\text{DISPONIBILIDAD} = \text{TPEF} / (\text{TPEF} + \text{TPRF})$$

De esta fórmula se deduce que el incremento en la disponibilidad se puede lograr o bien aumentando la confiabilidad de cada componente del sistema o reduciendo el tiempo de reparación. La redundancia en los equipos es usada para aumentar la confiabilidad, así como los reportes de error y recuperación automática de fallas para disminuir los tiempos de reparación de falla.

**REPORTES DE ERROR.-** El tipo de error reportado por el sistema de comunicaciones es aquél que puede ser detectado pero no corregido. La causa de un error es denominado una falla. La incapacidad de comunicarse con una parte de la planta requerirá la intervención de tareas que tomen acciones correctivas. El sistema debe contener al menos una tarea dedicada al reporte de errores. Si un mensaje particular contiene error, deberá ser notificado al nodo que envió el mensaje. A continuación se listan algunos errores típicos que pueden ser detectados



por un sistema de comunicaciones:

- Falla del protocolo.- El sistema detecta un error en el protocolo y es incapaz de reiniciar (reset) la comunicación. Esto ocurre cuando un mensaje enviado a una estación no llega a ésta, o cuando una de las tareas ha fallado.
- Incapacidad de iniciar una asociación, ya sea porque la otra tarea no está disponible, o porque la ruta no fue encontrada.
- Falta de espacio.

A continuación se listan algunas fallas que pueden ocasionar los errores listados anteriormente:

- Fallas en el hardware, como por ejemplo falla en la línea de transmisión o estaciones intermedias.
- Información continuamente alterada en una trayectoria particular, falla detectada por retransmisiones continuas.
- Fallas temporales debidas a pérdidas de información (tablas de configuración, pérdidas de estados).
- Interferencias en las líneas debidas a ruidos en el medio .

#### 4.1.7 Integridad de Información

La integridad en la transferencia de información indica si los mensajes son alterados durante su recorrido por el sistema. La integridad es frecuentemente especificada como una tasa de error residual , siendo este error definido a continuación:

$RER = \frac{\text{Número total de bits erróneos debido a corrupción, pérdida o duplicación}}{\text{número total de bits transmitidos}}$ . La integridad en la transferencia de información es primordial en aplicaciones de control de procesos por razones de seguridad. Las aplicaciones están frecuentemente rodeadas de movimientos de materiales o energía así que un incorrecto ajuste de un parámetro de control o pérdida de un mensaje de alarma puede llevar a condiciones peligrosas de operación.

Los sistemas de control para la mayoría de aplicaciones requieren tener tasas de error residual menor que  $1 \cdot 10^{-15}$ .

**CONTROL DE ERROR.-** El control de error está formado por los mecanismos para detección y corrección de errores, así como los de recuperación en caso de que el error no pueda ser corregido. La tasa de error del sistema de comunicaciones es generalmente más grande que la tasa de error residual requerida para la aplicación, así que los mecanismos de control de error se hacen indispensables.

Los tipos de error más frecuentes en los sistemas de comunicaciones incluyen a:

- la alteración de mensajes debido a ruido,
- pérdidas de mensajes debidas a fallas o alteración de la dirección destino,
- duplicación de mensajes debidas a retransmisiones.

La alteración de mensajes es detectada incluyendo información redundante, por ejemplo códigos cíclicos.

Pérdidas, duplicación de mensajes y secuencias erróneas pueden ser detectadas si se incluye un número secuencial en el encabezado del protocolo.

El control de error lleva al envío de información redundante en el mensaje, incrementando la longitud del mismo por lo que se debe negociar entre los requerimientos de funcionalidad y los de integridad. Cuando la realización de mecanismos de control de error que nos lleven a la tasa de error residual requerida sea impráctica se auxilia de mecanismos dependientes de

la aplicación como por ejemplo la verificación de la sintaxis del comando recibido.

#### 4.1.8 Reconfigurabilidad

Es la facilidad del sistema de comunicaciones para añadir o quitar nodos en la red. Reconfiguraciones pueden ser requeridas por razones de expansión o en casos de fallas de un nodo. Conectar un nuevo nodo en línea o desconectar uno existente debe afectar a lo más al mensaje que está siendo enviado en ese momento. Los mecanismos de control de error deben proveer una recuperación automática, a menos que el mensaje sea dirigido al nodo que está siendo desconectado, en cuyo caso un reporte de error deberá ser generado. Para realizar reconfiguraciones es necesario poder asignarle diferentes estados operativos a un nodo:

- a) disponible para operación remota y
- b) operando en forma local son ejemplos de estados operativos. Las facilidades de reconfiguración son dependientes de la topología de la red. La topología que más ventajas ofrece es la tipo bus.

#### 4.1.9 Resumen de Requerimientos

- Funcionalidad predecible y consistente.- Se deberá conocer el tiempo máximo de espera de un mensaje para ser transmitido, de manera que el tiempo de respuesta a condiciones anormales sea garantizado, además los tiempos de respuesta deberán mantenerse bajo condiciones de máxima carga (disparo de la planta).  
En general las trayectorias de tráfico ofrecidas al sistema de comunicaciones son menos aleatorias que en otras aplicaciones, ya que la mayoría de mensajes son generados por un dispositivo (controlador o módulo de adquisición) ejecutando un ciclo de muestreo.
- Integridad.- Las tasas de error residual requeridas para aplicaciones de control deben ser menores que  $1 \cdot 10^{-15}$ .
- Disponibilidad.- Por razones de seguridad en la operación de la planta es necesario mantener una alta disponibilidad del sistema de comunicaciones del orden del 99.99%.
- Reconfigurabilidad.- Se deberá facilitar la conexión y desconexión de nodos sin necesidad de parar el funcionamiento del sistema.
- Prioridad.- El sistema deberá facilitar el manejo de mensajes con diferente prioridad, al menos una deberá corresponder a mensajes de control y monitoreo de variables y otra a mensajes de manejo de alarmas y acciones correctoras.
- Escalabilidad.- Idealmente los servicios de comunicaciones son diseñadas para disminuir el costo por lo que el sistema debe funcionar con una instalación mínima y podrá crecer sin necesidad de reestructuración.

## 4.2 Especificaciones de Comunicaciones para el SDCD

### 4.2.1 Introducción

Los sistemas de control distribuido necesitan mecanismos de comunicación que permitan a los programas de aplicación (tareas) el intercambio de información y el compartimiento de recursos. Esto se logra por medio de un sistema de comunicaciones, el que facilita la conexión de diferentes módulos, entre los que se incluye a controladores, unidades de adquisición y computadoras. En cada módulo se encuentran ejecutándose tareas, algunas de ellas con necesidades de comunicación con otras tareas residentes en diferentes módulos. Todos los módulos conectados al sistema de comunicaciones están sujetos a un protocolo de comunicaciones, formado por un conjunto de reglas que hacen posible el intercambio de mensajes en forma rápida y segura.

### 4.2.2 Objetivo

Realizar la transferencia de información entre tareas del sistema de control distribuido, de manera que se asegure la integridad de la información y los mensajes sean manejados en los tiempos de respuesta requeridos.

### 4.2.3 Definiciones

El sistema de comunicaciones desde el punto de vista conceptual está formado por la red de comunicaciones, controladores de comunicaciones y programas de los controladores. Conectados al sistema de comunicaciones se tienen módulos inteligentes, entre los que se encuentran controladores, unidades de adquisición, consolas de operación y computadoras. La forma en como están relacionados se muestra en la figura 4.1.

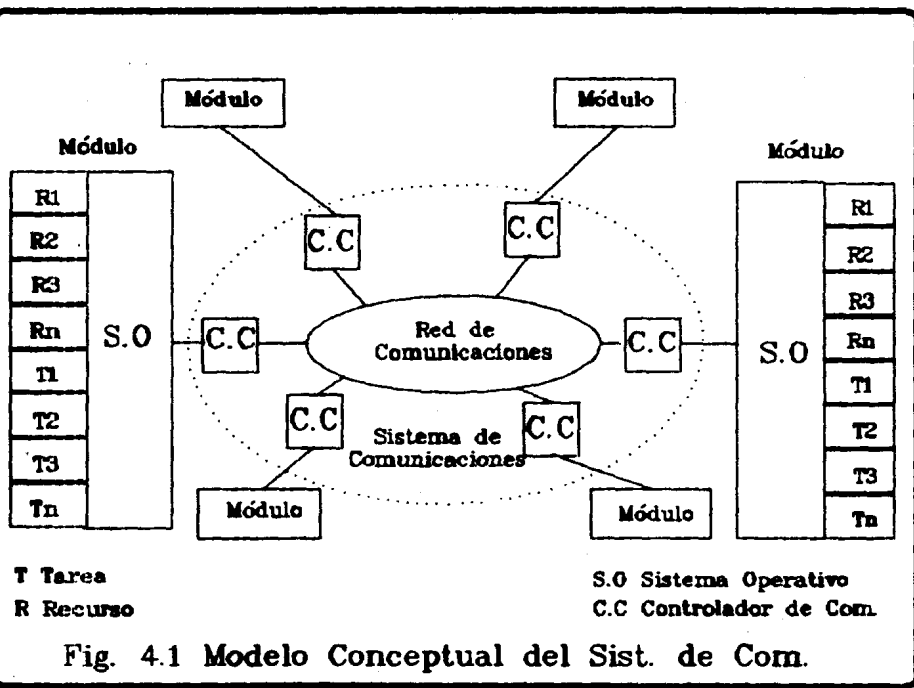
La red de comunicaciones permite la conexión física entre los dispositivos conectados al sistema.

Una tarea es un conjunto de instrucciones que son ejecutadas en forma dinámica por un módulo. El sistema de control distribuido tiene entre otras las siguientes tareas: adquisición binaria, control analógico y control digital.

El sistema de comunicaciones permite la transmisión de información entre tareas. Para que la transferencia de información sea realizada, se necesita seguir un conjunto de reglas denominadas protocolo.

El controlador de comunicaciones es el encargado de realizar el protocolo. Para que dos tareas se comuniquen sólo una de ellas debe solicitar el servicio de comunicaciones al controlador de comunicaciones.

Nodo es un punto de acceso a la red de comunicaciones, en cada nodo se encuentra ubicado un controlador de comunicaciones.



#### 4.2.4 Descripción General

Debido a la gran complejidad del sistema de comunicaciones, éste es organizado en una estructura lógica formada por capas, en donde cada capa agrupa a un conjunto de funciones y servicios de comunicaciones.

La estructura en capas es jerárquica en donde cada capa proporciona un servicio específico a la capa inmediata superior y usa los servicios de la capa inmediata inferior. En la figura 4.2 se ilustra la estructura en capas por medio de la comunicación de dos tareas.

Los programas de aplicación residentes en diferentes módulos, tienen acceso al sistema de comunicaciones por medio de un conjunto de funciones de comunicación, las que reciben como parámetros diferentes tipos de mensajes, destino del mensaje y prioridad de transmisión, entre otros. Las funciones son desglosadas por el controlador de comunicaciones en protocolos, correspondiendo a cada capa un protocolo de comunicaciones.

En conjunto el sistema de comunicaciones hace transparente la distancia entre usuarios y las fallas probables del sistema de comunicaciones.

Las características que debe reunir el sistema de comunicaciones son agrupadas bajo los siguientes rubros:

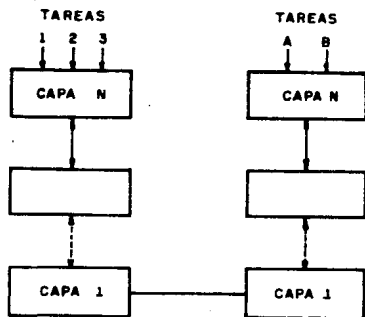
- Funcionalidad
- Protocolo
- Normalización

#### FUNCIONALIDAD

- El sistema deberá garantizar a cada nodo el acceso a la red al menos una vez por ciclo de trabajo. Un ciclo corresponde al período mínimo de monitoreo de señales.
- En la cola de mensajes de un controlador se da mayor prioridad a mensajes urgentes, tal es el caso de mensajes que avisen el cambio de estado de variables críticas (alarmas) y acciones correctivas.
- El sistema soporta la conexión de diferentes módulos, entre los que se encuentran: controladores, dispositivos de adquisición de datos y computadoras, entre otros.
- Distribución funcional de puntos de supervisión y control, los puntos de monitoreo y control del proceso dependen de la distribución y agrupación de procesos en la planta.
- Fácil conexión y desconexión de nodos a la red, sin afectar la operación de otros nodos.
- Para aumentar la disponibilidad, el sistema estará formado por dos canales del tipo bus y cada nodo estará conectado a ambos.
- En caso de falla del canal que está siendo usado, el otro canal funcionará en forma automática y sin intervención del operador.
- El cambio de canal no afecta la operación del sistema.
- El sistema deberá alertar al operador de un mal funcionamiento de un nodo o enlace de comunicaciones.

#### PROTOCOLO

- Todos los módulos conectados al sistema de comunicaciones seguirán el mismo protocolo, el cual tendrá las siguientes características:
- Comunicación con cualquier módulo conectado al sistema de comunicaciones.
- Transferencia de información orientada al envío de mensajes. Cada mensaje tendrá una



SISTEMA DE COMUNICACION

(a)



TRANSPARENCIA

(b)

Fig. 4.2 Estructura en Capas del Sistema de Comunicaciones

longitud mínima y una máxima.

- La comunicación no deberá ser ambigua; en cada transmisión se deberá identificar el nodo transmisor y el receptor.
- En comunicación punto a punto, el controlador de comunicaciones que transmite deberá recibir un mensaje de confirmación del controlador que recibe.
- Pérdidas de respuesta serán consideradas fallas.
- En caso que el controlador de comunicaciones reciba un mensaje y detecte error en su contenido, enviará al nodo transmisor un aviso de no reconocimiento de mensaje.
- Cada vez que el nodo transmisor reciba un aviso de no reconocimiento del mensaje, retransmitirá el mensaje.
- Cuando un mismo mensaje sea retransmitido más de tres veces seguidas se indicará que el nodo receptor tiene problemas en su controlador.
- En comunicación multipunto el dispositivo que transmite podrá enviar un mensaje dirigido a todos los dispositivos en la red (broadcast). Este tipo de mensaje no requiere confirmación.
- El protocolo realizará pruebas periódicas para conocer el estado operativo de los demás.
- Además de los mecanismos de detección de error y retransmisión, el protocolo deberá efectuar monitoreo sobre el estado de la red.
- El protocolo mantendrá en cada nodo un estado de la red por medio de descriptores y enviará el estado a los demás nodos en cuanto detecte un cambio.
- La información inicial será recabada por medio de un proceso de configuración de la red.
- De acuerdo a las necesidades de seguridad impuestas por el sistema y el medio ambiente industrial, el protocolo deberá detectar fallas en líneas y controladores conectados al sistema, así como tener mecanismos de recuperación.

**NORMALIZACION** Se recomienda que el sistema propuesto sea compatible con estándares internacionales de comunicación como el modelo OSI y más específicamente con las capas física y de enlace de datos del protocolo MAP.

## Capítulo 5

# ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES

### Alcances

La arquitectura del sistema de comunicaciones aquí propuesta tendrá los siguientes alcances:

- Será aplicable a sistemas distribuidos para el control y supervisión de Centrales Termoeléctricas normalizadas de acuerdo a la especificación J-100 de la CFE, ref[R5].
- Soportará una estructura jerárquica de Control Supervisorio de una unidad generadora.
- Cumplirá ampliamente con las especificaciones dadas en 4.1.9

La arquitectura de todo sistema está formada por el equipo y su distribución (topología) y los programas de base, a continuación será descrita la configuración del equipo así como la arquitectura general de los principales elementos de la red, después se describirá el sistema de comunicaciones por medio de un modelo en capas y finalmente se analizan y proponen las primitivas de comunicación de la capa de tiempo real.

### 5.1 Descripción del Equipo

El equipo principal conectado al sistema de comunicaciones estará constituido por cuatro módulos principales:

- Unidades de Adquisición de Datos (UAD).
- Unidades de Control de Proceso (UCP).
- Unidades de Interfaz de Operación (UIO).
- Unidades de Interfaz de Supervisión (UIS).

Además cada uno de estos módulos tendrá una interfaz de comunicaciones que le permita acceder la red.

Cada uno de estos módulos tendrá una estructura de software de base como la presentada en la sección 2.2.

Desde el punto de vista de diseño, el sistema de comunicaciones del SDCD es visto como una colección de puntos de acceso al sistema (nodos) desde donde entran y salen mensajes. En un SDCD para centrales termoeléctricas se han clasificado los nodos de acuerdo al tráfico que ellos generan y/o reciben, teniendose los siguientes tipos de nodos:



### Unidades de Adquisición de Datos (UAD)

A este tipo de nodos se encuentran conectados elementos microcomputarizados cuya función es realizar adquisición analógica o digital y enviar los valores obtenidos a las UIO y UIS. Para el sistema de comunicaciones representan unidades colectoras de señal y transmisoras de información a reportar.

El número inicial de señales que serán manejadas son:

1000 señales binarias.

100 señales binarias por interrupción (mse).

500 señales analógicas.

En la figura 5.1 se muestra la arquitectura típica de estas unidades.

#### 5.1.1 Unidades de Control de Proceso (UCP)

Este tipo de módulos presentan una arquitectura similar a la de las UAD de la figura 5.1 y su función es la de realizar el control lógico y analógico. Para la red representan nodos generadores de mensajes.

El número inicial de señales que serán manejadas son de acuerdo a ref.[R4]:

150 lazos simples de control.

1100 señales binarias de entrada/salida

Para adquirir y controlar las señales analógicas y binarias de las UAD y las UCP, y de acuerdo con las características de equipo comercial como la línea SAC-III y el equipo RTP de Computer Products, se necesita acceso a la red para las siguientes unidades:

1100 / 128 señales por UAD = 11 UAD para adq. binaria.

500 / 128 señales por UAD = 4 UAD para adq. analógico.

150 / 16 lazos por UCP = 10 UCP para control analógico.

1100 / 128 señales por UCP = 11 UCP para adq. binaria.

La mayor parte de los mensajes en un SDCD consisten en reportes de valores analógicos y binarios provenientes de las UAD y las UCP, en algunos sistemas como el presentado en la referencia [A28] se tiene que hasta un 90% del tráfico de mensajes es de este tipo.

#### 5.1.2 Unidades de Interfaz de Operación (UIO)

A este tipo de nodos se encuentran conectadas microcomputadoras equipadas con dispositivos periféricos para el almacenamiento y despliegue de información de un subconjunto del total de variables manejadas por el sistema. Son consideradas como unidades receptoras de mensajes. En estas unidades se llevará a cabo el procesamiento de señales adquiridas, tanto por las UAD como por las UCP, el procesamiento que se da a los datos es la conversión de una escala binaria a unidades de ingeniería, para el caso de datos adquiridos por las UAD estos se validan para detectar alarmas, todos los datos son registrados en la base de datos local (BDL).

Se instalarán cinco UIO, tres serán dedicada para la supervisión y control de la Caldera, la Turbina y el Generador que son los principales sistemas de una Central Termoelectrónica, una UIO para equipos auxiliares y otra UIO para la supervisión de señales del tratamiento de aguas en el laboratorio químico.

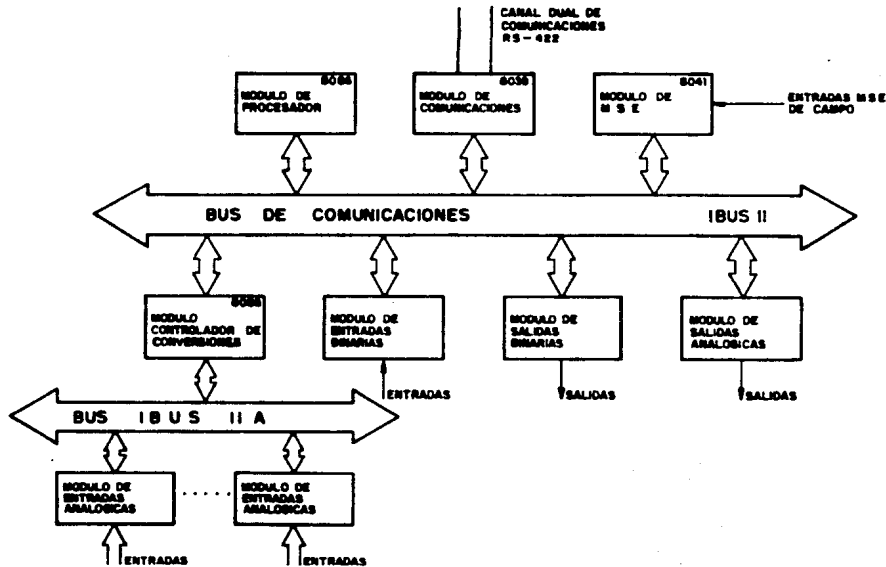


Fig. 5.1 Arq. de una Unidad de Adquisición de Datos

### 5.1.3 Unidades de Interfaz de Supervisión (UIS)

Son nodos que contienen minicomputadoras y dispositivos de almacenamiento masivo con capacidad de acceder cualquier variable del proceso. Se consideran como receptoras de mensajes.

De estas unidades se instalarán dos en el cuarto de control y desde ellas se podrán realizar todas las funciones que el ingeniero de proceso necesite para la supervisión y control.

**Cada uno de estos nodos tiene diferentes efectos en el caudal (throughput) y tiempo de respuesta del sistema y deberán ser considerados de diferente forma al tiempo de dimensionar el sistema.**

Como la mayoría de mensajes en un sistema de adquisición y control consiste en reportar los valores analógicos y estados de puntos (digitales), la cantidad de bytes por punto reportado es pequeña (4 bytes por señal analógica y grupo de 16 puntos binarios, 5 bytes por señal de MSE, ref[R6]), resultando la necesidad de transmitir en un mensaje un gran número de datos.

### 5.1.4 Controladores de Comunicaciones

El controlador de comunicaciones es una interfaz entre la red de comunicaciones y las diferentes unidades de procesamiento, su función es la de brindar todas las facilidades de comunicación basadas en el envío de mensajes. La arquitectura del controlador es la mostrada en la figura 5.2, en ésta se observa que el controlador es un dispositivo inteligente basado en un microprocesador y en un controlador de enlace (coprocesador), esta arquitectura permite a cada unidad (UAD, UCP, p.e.) el realizar las funciones de aplicación y las de comunicaciones de manera concurrente, el controlador puede realizar varias o todas las capas de un protocolo, es decir funcionar como un controlador de enlace o como un controlador de protocolos de alto nivel (front-end).

Comercialmente se anuncian controladores con estas características en donde el fabricante ofrece una configuración y el software para manejar un modelo de 7 capas, o bien la información técnica para desarrollar e implementar cualquier protocolo de alto nivel.

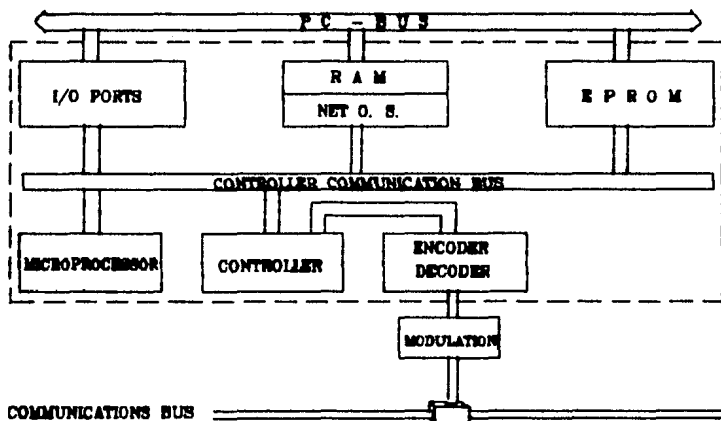


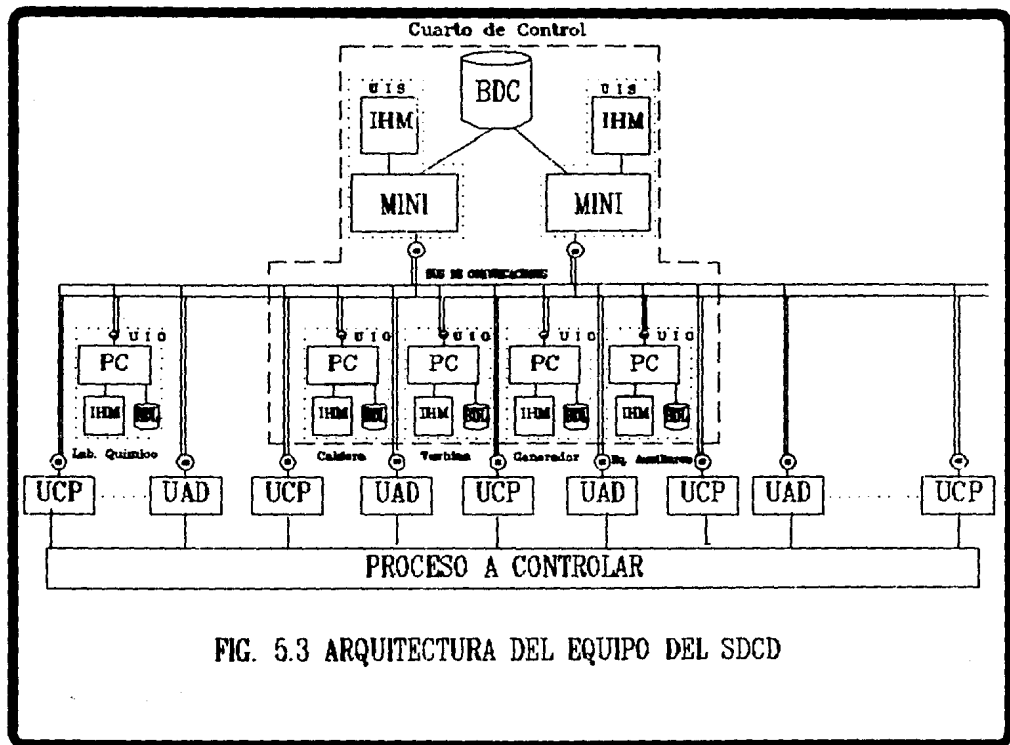
Figura 5.2: Arquitectura del Controlador de Com.

### 5.1.5 Configuración del Equipo

La configuración del equipo propuesto es modular y reconfigurable (ver secc. 4.1.8) y se propone la siguiente arquitectura:

- Una topología de bus, que es la que presenta mejores características de flexibilidad y recuperación de fallas.
- Bus de comunicaciones redundante para aumentar la disponibilidad.
- Las computadoras en los nodos deben ser compatibles, por ejemplo computadoras personales, los nodos de operación formados por computadoras del tipo PC y PC-XT industrial y para las computadoras de supervisión computadoras del tipo PC AT industrial o minicomputadoras.
- Los controladores y módulos de adquisición estarán formados por equipo basado en microprocesadores de 16 bits.
- Se deberá tener compatibilidad en el manejo de la información en los diferentes equipos, es decir se deberán manejar los mismos tipos de datos y longitud en bytes de acuerdo al tipo.
- Se tendrá una red de comunicaciones por unidad generadora.

En la figura 5.3 se muestra la arquitectura del equipo.



## 5.2 Organización de la Base de Datos

En este punto se propondrá la manera de manejar la información en el sistema.

Las necesidades de acceso de información dentro del SDCD son muy claras, se requiere acceso a información local desde las estaciones de operación y global desde las estaciones de interfaz de supervisión por lo que se propone que la base de datos sea distribuida y con la siguiente organización.

- Las unidades de interfaz de operación tendrán una base de datos local que les permita manejar las variables de la parte del proceso bajo su cargo.
- La capacidad de la base de datos local estará acotada por el número de variables que se supervisan en ese nodo y por el registro histórico que se desea tener, por ejemplo el registro histórico de las variables en X tiempo tomando las muestras K veces por minuto.
- Se tendrá una base de datos centralizada y manejada en una UIS, en donde se llevará el registro histórico de todas las variables del proceso.
- Para aumentar la disponibilidad del sistema se tendrá acceso a la base de datos centralizada por medio de dos UIS, ésto se realizará mediante un disco de acceso dual, que es conectado por medio de un bus paralelo a cada UIS. Sólo se accederá la base de datos por una UIS la otra trayectoria será usada sólo en caso de falla de la primera.

Las ventajas que ofrece esta organización son:

- Reducir el tráfico de mensajes , ya que la información es almacenada en el lugar en donde se va a presentar.
- Se mejora el tiempo de acceso a la información, ya que se reducen los retardos debidos a la petición de información por medio de mensajes.

Las principales desventajas ofrecidas por esta organización son:

- El mantener consistencia en la información que se tiene en las bases de datos locales y la base de datos centralizada.

### 5.3 Capas del Protocolo de Comunicaciones

El modelo OSI es concebido como un modelo de referencia que abarca la comunicación entre computadoras, con las siguientes características:

- La topología es formada por subredes, cada una con su propia estructura de interconexión (bus, anillo, árbol, p.e) y en conjunto formando una red compleja (mesh).
- La localización geográfica de la red es extensa (cientos de kms. ) y abarca varias localidades.
- Se manejan diferentes protocolos por subred.
- Las computadoras en los nodos son de diferentes marcas y en la mayoría de los casos incompatibles (formatos de tipos de dato y códigos, p.e.).
- Los mensajes pueden viajar por diferentes rutas para alcanzar el nodo destino.
- Compartimiento de recursos como impresoras, disco, cinta, software de base del sistema y otros.

Por otro lado la red local propuesta es un caso muy particular de comunicación entre computadoras, con las siguientes características:

- En la red lo que se encuentra distribuido es el procesamiento y la información de señales de campo y el objetivo es brindar los servicios necesarios para que tareas cooperantes puedan intercambiar información del estado del proceso a controlar.
- En principio la red no es diseñada para el compartimiento general de los recursos, aunque no es una restricción.
- Cada nodo tiene asignada una base de datos en tiempo real.
- La topología es un bus simple.
- Las trayectorias de conexión entre fuentes y destinos son directas, es decir no hay nodos intermedios.
- Las computadoras en los nodos son compatibles.
- Cada unidad conectada a un nodo sigue un protocolo único.
- La longitud máxima del mensaje se limita a 1024 bytes.

Para cumplir con los requerimientos generales de comunicación se propone formar el sistema de comunicaciones por medio de dos capas normalizadas del estándar 802.4 que son la física y la de enlace. Y para garantizar tiempos de respuesta compatibles con el proceso y tolerancia a fallas se propone la implementación de una capa denominada transporte en tiempo real (TTR).

En esta propuesta la capa de red desaparece al existir una trayectoria única entre nodos; Se consideran las capas de sesión y presentación innecesarias ya que el establecimiento de comunicación y la presentación son fijadas de antemano y son función de la aplicación.

En las siguientes secciones se describirá con más detalle las funciones de cada capa y sus servicios.

En la tabla 5.1 son resumidas las principales funciones de cada capa.

#### 5.3.1 Conceptos Generales

Cada nodo del sistema tiene asociado un número de nodo (0.255), un nombre (cadena de 6 caracteres) y un número de área; el número de área identifica un grupo de nodos interrela-

CAPA	PARAMETROS	DESCRIPCION
Física	Topología Vel. Transmisión Señalización Codificación Modulación Núm. de Nodos Medio físico Redundancia Long. max. del msg	Bus omnidireccional 5 Mhz Banda base Directa FSK fase coherente 64 Cable coaxial Incluida 1024
Enlace	Acceso al medio Integridad Servicios	Token Passing CRC32 Datagrama Cto. Virtual
T.T. Real	Tiempo de respuesta Servicios	menor de 0.1seg Notificación Pregunta-Respuesta Monitoreo de Red
Aplica.	Servicios	Transferencia de Inf. entre tareas

Tabla 5.1: Capas del Sistema de Comunicaciones Propuesto

cionados.

Cada tarea residente en cada nodo tiene asociado un nombre (cadena de 6 caracteres).

Cuando se haga referencia a las tareas se designará cómo fuente si la tarea es capaz de solicitar una relación lógica con otra tarea y cómo destino si la tarea se encarga de aceptar o rechazar una conexión lógica.

Una conexión lógica es una asociación de dos tareas para intercambiar mensajes. La conexión lógica se efectúa cuando en las tareas fuente y destino se crean puertos lógicos (sockets) del mismo tipo y se hacen coincidir.

Puertos lógicos son puntos direccionables de comunicación entre tareas.

#### 5.4 Capa de Aplicación

En esta capa de aparecen los dos primeros niveles de control presentados en la sección 3.1.2 y en esta capa se definen las funciones específicas del sistema: tratamiento de los mensajes de cada tarea (adquisición, control, alarmas, presentación, p.e), interpretación de la información, acciones a tomar al recibirse mensajes de alarma, acciones a tomar en caso de falla del bus de comunicaciones primario, presentación de la información en estaciones de operación.

Esta capa tendrá tres tareas relacionadas con el sistema de comunicaciones y son:



**Tarea de Configuración de Red .-** Por medio de esta tarea se realizará la definición de parámetros iniciales del sistema como son la identificación del nodo, la definición de las tareas que usarán los servicios de la capa de transporte, la definición de puertos lógicos (socket) entre tareas que realizan transacciones del tipo pregunta/respuesta.

La configuración de puertos lógicos es dinámica, con lo que puedan ser creados y modificados en cualquier tiempo, lo que brinda flexibilidad para dar de alta y baja nodos y para cambiar relaciones lógicas entre UAD, UCP y UIO.

Se tendrán tareas de configuración en las unidades de operación y en las unidades de interfaz de supervisión, desde las UIO se podrán configurar las UAD y UCP a su cargo. En las UAD y UCP se tendrán definidos (default) dos puertos lógicos, uno entre la unidad y su unidad de operación asociada, y el otro entre la unidad y la unidad de interfaz de operación encargada del manejo de la base de datos central; por medio de estos puertos se inicia la configuración de cada unidad.

**Tarea de Administradora de Comunicaciones.-** Esta tarea maneja todas las solicitudes de envío y recepción de mensajes entre tareas ubicadas en diferentes nodos, una de sus funciones es llevar los estados en que se encuentran las tareas; una tarea que realiza operaciones de comunicación puede estar en uno de cuatro estados:

- Inactiva.- La tarea no está siendo ejecutada.
- Activa.- la tarea se encuentra ejecutando operaciones que no involucran los servicios de comunicaciones.
- TX.BLO.- Bloqueada al realizar una operación de envío.
- RX.BLO.- Bloqueada en espera de mensaje.

**Tarea de Reporte de Fallas.-** Esta tarea será la encargada de la interpretación de los códigos de error que fueron detectados por la capa de transporte. En las estaciones de operación se desplegarán mensajes asociadas a las fallas; en las UAD y UCP se indicarán las fallas por medio de indicadores luminosos (led's).

## 5.5 Capa de Transporte en Tiempo Real

Las funciones principales de esta capa son dos:

- Garantizar tiempos de respuesta y robustez por medio de la implementación adecuada de primitivas de comunicación.
- Y el monitoreo del estado de la red por medio de una tarea de diagnóstico.

Esta capa será implementada a nivel software del controlador de comunicaciones, lo que libera al procesador central (UAD, UCP,p.e) de esta tarea. En cada nodo se ejecutarán de manera concurrente las tareas de aplicación y comunicaciones.

### 5.5.1 Tipos de Transacciones del SDCD

Los requerimientos de comunicaciones para transferencia de información del tipo (ver sección 4.1) comando/respuesta, alarmas y registro de información de estados del proceso(períodica,eventos

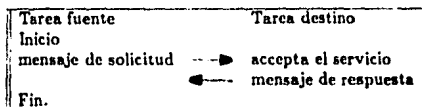


Tabla 5.2: Transacción Pregunta-Respuesta

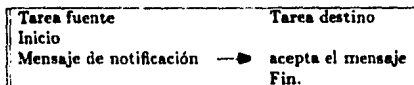


Tabla 5.3: Transacción de Notificación

y por petición) son modelados por dos transacciones de comunicaciones:

- Pregunta-Respuesta (request-reply).
- Notificación (notify).

**Pregunta-Respuesta.**- Esta transacción consiste de dos mensajes, el primer mensaje es una solicitud del nodo fuente al nodo destino pidiendo un servicio, el cual puede consistir en una acción sobre algún elemento de la planta o el envío de los estados de las variables de una parte del proceso. El segundo mensaje es la respuesta del nodo destino al nodo fuente y contiene información referente a la realización del servicio solicitado.

Esta transacción se ajusta a los requerimientos de transferencia de información por petición y mensajes de solicitud de servicio (comando/respuesta). Las necesidades de diferentes tiempos de respuesta en las transferencias pueden ser manejadas por medio de prioridades en el manejo de mensajes; es decir las transferencias de información del tipo comando/respuesta tendrán mayor prioridad que las del tipo petición de información del proceso.

El flujo de información es de una fuente a un destino.

**Notificación.**- Esta transacción consiste de un mensaje que lleva información que no ha sido solicitada; es decir no forma parte de una transacción Pregunta/Respuesta.

Esta transacción de comunicaciones se ajusta a las necesidades de transferencia de información del tipo alarmas, información de estados del proceso (periódica y eventos). También se usa en el caso comando-respuesta inmediata-respuesta retardada, los diferentes tiempos de respuesta requeridos para cada transferencia de información pueden ser manejados por medio de prioridades. El flujo de información es de un fuente a uno o más destinos.

MENSAJE	T. RESP	DISP.	PRIOR.	TRANSACCION
ALARMAS	MUY CORTO	ALTA	1	NOTIFICACION
REG. DE INF. EVENTOS	CORTO	MEDIA	2	NOTIFICACION
REG. DE INF. PER.	MEDIO	MEDIA	2	NOTIFICACION
COMANDO/RESPUESTA	CORTO	ALTA	1	PREG./RESP.
REG. DE INF. PETICION	CORTO	MEDIA	2	PREG./RESP.

Tabla 5.4: Relación Mensaje-Transacción

En la tabla 5.4 se puede apreciar la relación propuesta entre mensajes y transacciones, enseguida se explican las relaciones menos obvias:

- El mensaje de alarmas debe ser del tipo NOTIFICACION ya que la transacción del tipo PREG./RESP. bloquea a la tarea al iniciar la transacción, esto es peligroso ya que deja al sistema sin atención a alarmas.
- Los mensajes de registro periódico de información pueden ser del tipo NOTIFICACION o PREG./RESP., se propone el uso de la transacción NOTIFICACION ya que la actualización de variables es periódica y la pérdida de una muestra no afecta ni la presentación en pantalla de valores ni el registro histórico de valores.
- Se propone incluir dentro de los mensajes comando/respuesta uno que pida la información, con lo que los mensajes de registro de información ya no son necesarios.

Existe una relación muy estrecha entre el tipo de transacción y el tipo de nodos:

Las unidades de control de proceso y las unidades de adquisición de datos realizan transacciones del tipo NOTIFICACION.

Las unidades de interfaz de operación y supervisión inician transacciones del tipo PREG./RESP..

#### **Tiempo de Respuesta de la Tarea**

Es el tiempo tomado por una tarea para reconocer que una entrada está presente y tomar las acciones requeridas para atender dicha entrada. En sistemas de control en tiempo real una violación de las constantes del proceso constituye una falla y puede llevar a condiciones inseguras de operación.

#### **Robustes de la Tarea**

El acoplamiento de componentes (estaciones) del sistema por medio de un canal serial aumenta la integridad del sistema a nivel físico, ya que el efecto de una falla como es la de un procesador, deja fuera de operación a sólo una estación. La integridad soportada a nivel físico debe mantenerse a nivel de transacciones lógicas. En particular requerimos tareas robustas que puedan tolerar fallas en las transacciones en que ellas participan y puedan operar en tiempos compatibles con el proceso. A continuación analizaremos las condiciones que deben ser tomadas en cuenta al momento de proponer las primitivas de comunicaciones.

Tarea Fuente.- La transacción del tipo Pregunta-Respuesta pueden fallar bajo las siguientes condiciones:

- Pérdida del mensaje de Pregunta por el sistema de comunicaciones.
- Que la tarea destino no acepte el mensaje debido a fallas.
- Fallas en la tarea destino mientras está atendiendo al mensaje de Pregunta.
- Pérdida del mensaje de Respuesta por el sistema de comunicaciones.

Las tareas están de alguna manera relacionadas, por lo que cuando una tarea está esperando la terminación de una transacción del tipo Pregunta-Respuesta no puede responder a otras entradas, que pueden provenir del proceso en la planta o de otras tareas. Para preservar un tiempo de respuesta en el peor de los casos, una tarea debe ser capaz de esperar un tiempo determinado por la terminación de la transacción, al término del cual tomará decisión sobre el éxito o falla de la operación.

Las transacciones del tipo Notificación son completamente independientes por lo que no comprometen la integridad de la tarea a la que es enviado el mensaje.

**Tarea Destino.-** Los requerimientos de integridad de la tarea destino, son el de no ser suspendida por tiempo indefinido, al estar esperando por una transacción que no ha sido iniciada, debido a fallas en la tarea fuente o debido a fallas en el sistema de comunicaciones.

Para resolver este problema la tarea destino debe tener un tiempo de espera máximo por la ocurrencia de la transacción.

### 5.5.2 Primitivas propuestas para el SDCD

Los servicios de una capa son las facilidades ofrecidas al usuario de la siguiente capa, para el caso de la capa de transporte los servicios que ofrece a la capa de aplicación lo constituyen las primitivas de comunicaciones

En esta sección serán descritas las primitivas de comunicación y los parámetros que son característicos de cada una.

#### Pregunta-Respuesta

Servicio de comunicación orientado a la conexión lógica de tareas, esta formada por dos funciones una de transmisión **tx\_blo** y otra de recepción **rx\_blo**, son primitivas de comunicación del tipo llamada a procedimiento remoto y tienen asociado un tiempo de espera máximo por la completación satisfactoria de la operación. A continuación se describirán con más detalle las funciones:

**NOMBRE:** **tx\_blo** solicita un servicio a una tarea destino usando un puerto lógico (socket) previamente establecido.

**SINTAXIS:** **bexit** = **tx\_blo** (destino,buf\_pre,buf\_res,ban\_err);

**DESCRIPCION:** la llamada a este procedimiento es usada para transmitir mensajes de petición de servicio a una tarea destino, si la operación tiene éxito recibe un mensaje con la confirmación del servicio realizado y datos asociados.

Cuando la llamada es realizada la tarea fuente es bloqueada y se le regresa el control hasta que recibe el mensaje de respuesta a su solicitud o se vence el tiempo de espera por la respuesta. El tiempo máximo de espera (tiempo de bloqueo) así como el nivel de prioridad del mensaje son parámetros asociados a esta llamada, mismos que son definidos en la configuración de un nodo al momento de definir los puertos lógicos entre tareas.

#### PARAMETROS:

**bexit** bandera que indica si la transacción tuvo éxito o no, su valor es uno para el caso de éxito y cero en caso de falla.

**destino** especifica la dirección de la tarea destino por medio de un identificador de puerto lógico.

**buf\_pre** apuntador al área de memoria que contiene el mensaje a transmitir.

**buf\_res** apuntador al área de memoria en que se depositará el mensaje de respuesta.

**berror** bandera que indica el tipo de error que causó que la transacción no se completara.

A continuación se describen los errores devueltos en **berror**:

**ERRCON** el parámetro **destino** no contiene un identificador de puerto lógico válido.

**ERRLON** la longitud del mensaje de pregunta es mayor de 1024 bytes.

**ERRED** la red no se pudo acceder, posible falla en el controlador de comunicaciones.

**ERRDES** el puerto lógico fué desconectado antes de que se completara la transacción.

**ERRTIM** se venció el tiempo de espera máxima y la transacción no pudo completarse.

**ERRLIN** posible error en la línea física que une el nodo fuente y el destino.

**ERRNOD** falla probable en el CPU destino.

**ERRCTRL** falla probable en el controlador, debida a: daño en la interface de conexión entre bus y controlador, modulador apagado o daño en la tarjeta controladora de comunicaciones.

**NOMBRE:** **rx\_blo** recibe mensaje de solicitud de servicio usando un puerto lógico previamente establecido.

**SINTAXIS:** bexit = **rx\_blo** (fuente,buf.pre,ban.err);

**DESCRIPCION:** la llamada a este procedimiento es usada para recibir un mensaje por medio de un puerto lógico. Si no se tiene el mensaje disponible al momento de realizar la llamada la tarea que lo invocó es bloqueada por un tiempo determinado; si al término de este tiempo no se tiene el mensaje se considera que la operación falló.

**PARAMETROS:**

bexit bandera que indica si la transacción tuvo éxito o no, su valor es uno para el caso de éxito y cero en caso de falla.

fuente especifica la dirección de la tarea fuente por medio de un identificador de puerto lógico.

buf.pre apuntador al área de memoria asignada para depositar el mensaje de solicitud de servicio.

berror bandera que indica el tipo de error que causó que la transacción no se completara.

A continuación se describen los errores devueltos en berror:

**ERRCON** el parámetro fuente no contiene un identificador de puerto lógico válido.

**ERRED** la red no se pudo acceder, posible falla en el controlador de comunicaciones.

**ERRTIM** se venció el tiempo de espera máxima y la transacción no pudo completarse.

NOMBRE: **tx\_res** transmisión de mensaje de respuesta.

SINTAXIS: **tx\_res** (destino,buf\_res);

DESCRIPCIÓN: Este procedimiento es llamada después de recibir un mensaje de solicitud de servicio y haber realizado las acciones pedidas. La llamada a este primitiva no bloque la tarea.

Se toma la información del almacén **buf\_res** y se envía por el puerto lógico destino.

**buf\_res** apuntador al área de memoria que contiene el mensaje de respuesta.

**destino** especifica la dirección de la tarea por medio de un identificador de puerto lógico.

A continuación se da un ejemplo del apareamiento de ésta primitiva y **rx\_blo**:

Si **rx\_blo**(fuente,buf\_pre,ban\_err) entonces

Inicio

realiza función **buf\_pre.fun** ;

forma mensaje de respuesta ;

**buf\_res** := mensaje de respuesta;

**tx\_res**(fuente, **buf\_res**);

Fin

sino decodifica(**ban\_err**);

**Notificación**

Servicio sin conexión forjado por las funciones de envío y recepción asíncronos con la restricción de que para la transmisión exista almacenamiento para un solo mensaje pendiente asociado a cada tarea fuente, cuando se llena el almacén y se realizan operaciones de envío causan una sobrescritura con lo que la información anterior se pierde, la tarea destino cuando acepta el mensaje obtiene la última información, la cual es de interés en sistemas de control en tiempo real ya que es la última lectura del sensor o valor de alarma.

El uso de un almacén por parejas fuente-destino permite a la tarea fuente el producir información a razones más altas de las que se envía la información al destino. Para que esta estrategia funcione es requisito indispensable que se envíen valores absolutos del valor de las variables ( 25 grados C, p.e ) y no incrementos, de tal manera que se puedan perder valores (sobrescritura) sin afectar subsecuentes recepciones de información en la tarea destino ref[A22].

**NOMBRE:** tx envía mensaje del tipo difusión.

**SINTAXIS:** tx (buf.tra,prioridad);

**DESCRIPCION:** la llamada a este procedimiento es usada para transmitir sin bloqueo mensajes de difusión (broadcast).

**PARAMETROS:**

buf.tra apuntador al área de memoria que contiene el mensaje a transmitir.

prioridad indica la prioridad con que se enviará el mensaje.

**NOMBRE:** rx recibe mensajes enviados por medio de la función tx.

**SINTAXIS:** bexit = rx (buf\_rec,ban.err);

**DESCRIPCION:** la llamada a este procedimiento es usada para recibir mensajes enviados por medio de la función tx. La llamada tiene asociada un tiempo de espera.

**PARAMETROS:**

bexit bandera que indica si la transacción tuvo éxito o no, su valor es uno para el caso de éxito y cero en caso de falla.

buf\_rec apuntador al área de memoria que contiene el mensaje recibido .

berror bandera que indica el tipo de error que causó que la transacción no se completara.

A continuación se describen los errores devueltos en berror.

**ERRTIM** se venció el tiempo de espera por el mensaje.

**ERRED** la red no se pudo acceder, posible falla en el controlador de comunicaciones.



### 5.5.3 Monitoreo de Red

Para asegurar una alta disponibilidad del sistema de comunicaciones, además de los mecanismos de detección de error que se manejan en la capa de enlace se usan técnicas de recuperación y reporte de fallas.

El monitoreo de red es una tarea que se dedica a identificar y clasificar por grado de severidad (normal y crítica) las fallas en el sistema de comunicaciones, una vez que la falla es identificada se toman acciones que van desde indicar por medio de un código de error que se tienen problemas de ruido en la línea hasta realizar un respaldo de red de comunicaciones ( poner en operación a los controladores de comunicación de respaldo ).

Esta tarea genera los códigos de error en línea ERRLIN, error en el nodo ERRNOD y error en el controlador de comunicaciones (ERRCTRL). estos errores son pasados como parámetros de regreso al programa de aplicación que llama a las rutinas de transmisión tx.blo y recepción rx.blo.

El monitoreo de red consiste básicamente en dos funciones:

Funcionamiento de los nodos.- por medio del intercambio de mensajes con datos conocidos ( trayectorias de prueba ) se detecta el buen funcionamiento de los nodos. Se tendrá un mecanismo en software que permita regresar el mensaje recibido ( remote loop back ); el nodo destino envía un mensaje y el nodo fuente lo regresa de tal manera que el nodo destino al recibir el mensaje reflejado pueda saber si la no contestación del nodo destino es debida a fallas en el controlador o en la computadora de aplicación.

Estado de la línea.- Por medio del envío de mensajes conocidos y siguiendo una secuencia ordenada por posición física de los nodos en la red detectar daños en la línea.

La conmutación al nodo de respaldo se realiza cuando se detectan daños en la línea o en alguno de los controladores.

## 5.6 Capa de Enlace

La capa de enlace será manejada por medio de un controlador de comunicaciones dedicado y compatible con los estándares 802.2 y 802.4.

Las funciones de la capa de enlace son realizadas por medio de dos subcapas: la de enlace lógico y la de control de acceso al medio.

### Subcapa de Enlace Lógico

La capa de enlace lógico (LLC) maneja la transmisión de tramas (FRAME) de datos entre dos estaciones sin nodos intermedios, sus funciones específicas son: iniciar y controlar el intercambio de información (frames), organizar el flujo de datos, interpretar comandos y generar respuestas, realizar funciones de control y recuperación de error.

La capa de control de acceso al medio (MAC) la cual soporta funciones dependientes del acceso al medio, usa los servicios de la capa física para proporcionar servicio a la capa de enlace lógico.

De estas dos capas, LLC y MAC, la subcapa LLC es común a los protocolos normalizados y constituye el estándar 802.2, a continuación serán descritos los puntos más importantes de cada subcapa.

### CAPA DE ENLACE LOGICO Los servicios que proporciona son:

- **Servicio sin conexión y sin reconocimiento.**- este es un servicio del tipo datagrama que permite enviar y recibir tramas de información sin establecimiento de conexión previa, además los marcos no son reconocidos, ni el control de flujo ni recuperación de error son proporcionados. Este servicio soporta enlaces punto a punto, multipunto y difusión(broadcast). Este servicio es realizado por las siguientes funciones primitivas: L-DATA.request y L-DATA.indication.
- **Servicio sin conexión y con reconocimiento.**- servicio del tipo datagrama en el que los marcos enviados son reconocidos. Este servicio es realizado por las siguientes funciones primitivas: L-DATA-ACK.request, L-DATA-ACK.indication y L-DATA-ACK.confirm
- **Servicio orientado a conexión.**- este es un servicio del tipo circuito virtual en donde se necesita conexión previa al intercambio de mensajes. Las tramas son reconocidos, se realiza control de flujo y recuperación de error. Este servicio es realizado por las siguientes funciones primitivas:  
 L-DATA-CONNECT.request, L-DATA-CONNECT.indication,  
 L-DATA-CONNECT.confirm,  
 L-CONNECT.request, L-CONNECT.confirm, L-CONNECT.indication,  
 L-DISCONNECT.request, L-DISCONNECT.indication, L-DISCONNECT.confirm,  
 L-RESET.request, L-RESET.indication, L-RESET.confirm,  
 L-CONNECTION-FLOWCONTROL.request,  
 L-CONNECTION-FLOWCONTROL.indication.

Además de las funciones primitivas para el envío de información la capa de enlace proporciona funciones de administración general:

- Para el flujo adecuado de datos y marcos de control con la capa de transporte (TTR):

L-SAP-FLOWCONTROL.request y L-SAP-FLOWCONTROL.indication

- Para la realización de pruebas y envío de estados:  
L-TEST.request y L-TEST.indication.  
L-STATUS.request, L-STATUS.confirm y L-STATUS.indication.
- Para la activación y desactivación de puntos de servicio (SAP):  
L-SAP-ACTIVATE.request y L-SAP-ACTIVATE.confirm.  
L-SAP-DEACTIVATE.request, L-SAP-DEACTIVATE.indication y  
L-SAP-DEACTIVATE.confirm.
- Para activar y desactivar el nodo de la red.  
L-LAYER-ACTIVATE.request y L-LAYER-ACTIVATE.confirm.  
L-LAYER-DEACTIVATE.request, L-LAYER-DEACTIVATE.confirm y  
L-LAYER-DEACTIVATE.

#### INTERFACE ENTRE LLC Y MAC

La comunicación entre LLC y MAC es efectuada por tres funciones primitivas :  
MA-DATA.request, MA-DATA.confirm, MA-DATA.indicate.

#### Subcapa de Control de Acceso al Medio

Las principales funciones de la subcapa de control de acceso al medio son (MAC):

- Detección y recuperación de pérdida de ficha (TOKEN).
- Inicialización de la operación del anillo virtual.
- Reconocimiento de mensajes para el nodo.
- Formación de las tramas (FRAME).
- Cálculo y verificación de error (FCS).
- Reconocimiento de ficha válida.
- Insertar un nuevo miembro al anillo.
- Recuperación de fallas en el nodo.

Los servicios que proporciona esta subcapa son:

MA-DATA.request, MA-DATA.indication y MA-DATA.confirm.

## 5.7 Capa Física

La capa física será implementada siguiendo el estándar 802.4 en la recomendación para modulación en fase coherente FSK, las principales características son resumidas en la tabla 5.1

## Capítulo 6

# EVALUACION

Utilización, tiempo de respuesta, disponibilidad y costo son los factores más importante a ser considerados cuando se diseña una red de comunicaciones.

En redes que van a ser usadas para aplicaciones en tiempo real el factor principal es el tiempo de respuesta que debe ser compatible con la dinámica del proceso. Asociado al tiempo de respuesta se tiene el acceso determinístico a la red, es decir el garantizar que todos los nodos tengan el derecho de acceder la red dentro de un intervalo de tiempo que en la mayoría de los casos es menor que el tiempo de respuesta requerido.

En esta sección se realizará la evaluación de la red y se pondrá especial atención al cálculo teórico de la utilización y tiempo de respuesta del sistema propuesto. Se considera únicamente el tráfico de mensajes debidos al movimiento de información entre unidades de adquisición y control, y unidades de operación y supervisión; tráfico que constituye el 90% del tráfico total, ver ref[A28].

### 6..1 Utilización

El análisis de utilización y tiempo de respuesta usado en esta evaluación fué realizado tomando como referencia el análisis presentado en la ref[A19], un estudio más detallado del diseño de redes de comunicación y distribución de datos aparece en la ref[A18].

La configuración del sistema tiene las siguientes variables:

$N_{aj}$ = Número de nodos del tipo UAD,  $j=1,2.. 26$ ;

$N_{cj}$ = Número de nodos del tipo UCP,  $j=1,2.. 10$ ;

$N_{oj}$ = Número de nodos del tipo UIO,  $j=1,2.. 5$ ;

$N_{sj}$ = Número de nodos del tipo UIS,  $j=1,2$ ;

Los datos manejados por el sistema son de tres tipos: analógicos, digitales y de control, cada tipo tiene asociado un tiempo de reporte, se asume que el tiempo entre reportes sucesivos es limitado a un rango específico dado por  $T_{min}$  y  $T_{max}$ .

$T_{min}$  = tiempo mínimo entre reportes de un punto dado , el cual establece un límite superior para la velocidad de reportes de puntos.

$T_{max}$  = tiempo máximo entre reportes de un punto dado, aún cuando el punto no cambie o lo haga lentamente es deseable reportar su estado periódicamente.  $T_{max}$  proporciona un límite inferior en la velocidad de reportes de puntos.

Los puntos son clasificados de acuerdo a los tiempos de reporte como:

- Puntos de cambio lento.- son puntos de cualquiera de los tres tipos que no están en alarma y son reportados con un período  $T_{max}$ .
- Puntos de cambio rápido.- son puntos de cualquiera de los tres tipos que no están en alarma y son reportados con un período  $T_{min}$ .
- Puntos en alarma.- son puntos de cualquiera de los tres tipos que están en condición de alarma y son reportados con un período  $T_{min}$ . Un punto analógico está en alarma cuando sobrepasa los límites de operación normal; para el caso de señales digitales, cuando cambia su estado de operación normal (abierto, cerrado, p.e.).

El total de puntos de un tipo  $t$  está forma por fracciones de puntos con diferentes tiempo de reportes, a continuación se listan las variables asociadas a cada punto:

$P_t$  = Número de puntos de cada tipo.

$F_{crt}$  = Fracción de puntos del tipo  $t$  con cambio rápido.

$F_{clt}$  = Fracción de puntos del tipo  $t$  con cambio lento.

$F_{at}$  = Fracción de puntos del tipo  $t$  que están en alarma.

$t$  = Analógico, binario y control.

Los valores de estas fracciones se obtienen de análisis estadístico del proceso y se necesitan los valores bajo condición de funcionamiento normal y de disparo de la planta. Se denomina condición de disparo al cambio repentino y brusco del comportamiento normal de la planta. La suma de las fracciones para cada condición deben ser el 100%.

Los siguientes parámetros son característicos del sistema de comunicaciones:

$L_{ov}$  = message overhead, bytes enviados en el mensaje y que no contienen información de puntos.

$L_t$  = longitud en bytes de cada punto del tipo  $t$ , cada punto reportado lleva el valor más la identificación del punto, lo que da como resultado longitudes del orden de 8 bytes por punto.

$S_j$  = velocidad del bus de comunicaciones, las longitudes de los mensajes en bytes son convertidas a tiempo de transmisión usando este parámetro y el valor de 8 bits por byte.

#### Cálculo de velocidad de puntos a reportar

El primer paso en el análisis involucra el cálculo de velocidades promedio  $R_p$  a las que los puntos deben ser reportados (puntos/segundo) y las velocidades promedio  $R_d$  a que los datos asociados a esos puntos deben ser transmitidos (bytes/segundo). A continuación serán dadas las fórmulas para calcular las velocidades promedio:

$$R_{p_n} = \sum_t \left[ \frac{P_t F_{crt}}{T_{min}} + \frac{P_t F_{clt}}{T_{max}} \right] \text{ puntos/seg}$$

$$Rp_a = \sum_i \left[ \frac{P_i F a_i}{T_{min}} \right] \text{ puntos/seg}$$

$$Rp = [Rp_n + Rp_a] \text{ puntos/seg}$$

$$Rd_n = \sum_i \left[ \frac{L_i P_i F c r_i}{T_{min}} + \frac{L_i P_i F c l_i}{T_{max}} \right] \text{ bytes/seg}$$

$$Rd_a = \sum_i \left[ \frac{L_i P_i F a_i}{T_{min}} \right] \text{ bytes/seg}$$

$$Rd = [Rd_n + Rd_a] \text{ bytes/seg}$$

### Velocidades y Longitudes de Mensajes

Para el cálculo promedio de puntos y longitudes en bytes de los mensajes, se considera que varios puntos son enviados por mensaje y que el envío de mensajes es multidestino (broadcast), además se limita la longitud máxima del mensaje a  $L_{max}$ .

Se tienen las siguientes variables en cada UAD y UCP, involucradas en los cálculos:

$T_{pack}$  = intervalo de tiempo que le lleva a la unidad adquirir y empaquetar los datos en un mensaje, entre más grande es el intervalo más eficiente es la operación en modo multidestino y más lenta es la respuesta a un evento reportado, ya que el nodo mantiene el evento por el tiempo de  $T_{pack}$ . valores comunes para este intervalo están comprendidos entre 0.1 seg y 1 seg.

$N_a$  = total de puntos adquiridos en estado de alarma de cada UAD o UCP, en un intervalo de empaque.

$N_n$  = total de puntos adquiridos que cambiaron y no están en estado alarma de cada UAD o UCP, en un intervalo de empaque.

El número de puntos adquiridos en un intervalo  $T_{pack}$  es el producto de la velocidad de

reportes por el intervalo de tiempo.

$$N_a = R_{pa} * T_{pack} \text{ puntos/intervalo};$$

$$N_n = R_{pn} * T_{pack} \text{ puntos/intervalo};$$

El número de puntos se tiene que convertir a bytes por lo que se necesita la longitud promedio de cada punto del tipo t.

$$L_{prom} = R_d/R_p \text{ bytes/punto};$$

$N_d$  = número promedio de bytes asociados a los puntos adquiridos en el intervalo  $T_{pack}$ .

$$N_{da} = N_a * R_{da}/R_{pa} \text{ bytes/intervalo};$$

$$N_{dn} = N_n * R_{dn}/R_{pn} \text{ bytes/intervalo};$$

El número promedio de mensajes a ser transmitido por unidad en un intervalo de tiempo esta dado por:

$$K_a = N_{da}/L_{max} \text{ mensajes/unidad/intervalo};$$

$$K_n = N_{dn}/L_{max} \text{ mensajes/unidad/intervalo};$$

Los valores de K son redondeados al entero más alto.

La longitud promedio del mensaje por UAD o UCP esta dado por:

$$L_m = N_d/k + L_{ov} \text{ bytes};$$

El número de mensajes promedio por cada UAD y UCP esta dado por:

$$R_m = K_n/T_{packmsg}/seg/unidad$$

Se tendrán dos tipos de mensajes, uno para enviar información de alarmas y otro para enviar cambios lentos y rápidos. En la fórmula de utilización se incluyen estos dos tipos de mensajes:

$$P_j = \sum_k \left[ \frac{8R_{m_k} * L_{m_k} + 8R_{ma_k} * L_{ma_k}}{S_j} \right]$$

El subíndice k varia desde 1 hasta el número total de UAD+UCP, la utilización debe ser evaluada para condición normal  $P_{jn}$  y para condición de disparo  $P_{jd}$ .

Cuando la utilización del medio de transmisión es mayor del 100% no se pueden transmitir todos los mensajes generados, con lo que algunos de ellos esperan para ser enviados. Los sistemas de comunicación para aplicaciones en tiempo real se diseñan para que en condición de funcionamiento normal y de disparo la utilización sea menor del 100%. Cuando la utilización del medio es mayor del 100% para la condición de disparo se tiene un intervalo de tiempo denominado tiempo de limpieza (clearing time) en el que los mensajes pendientes son enviados. El tiempo de limpieza Tl puede ser expresado en función del tiempo que dura la condición de disparo Td y de la utilización del medio en condición normal Pjn y de disparo Pjd como:

Si (Pjd mayor que 1) entonces

$$Tl = Td (1 - Pjd) / 1 - Pjn \text{ segundos;}$$

En las tablas 6.1 y 6.2 se hace una evaluación teórica la utilización de la red para el caso de operación normal y de disparo. Las consideraciones que se hacen son :

- Carga principal proveniente de UAD y UCP.
- Todos los puntos son enviados en el intervalo Tmax.
- En una UAD se pueden tener 128 señales analógicas y digitales.
- 32 UAD para manejar 4096 señales.
- Se manejan 16 lazos de control por UCP.
- 10 UCP para manejar 160 lazos.

## 6.2 Tiempo de Respuesta de la Red

Una de las características principales de la arquitectura propuesta es que el tiempo de respuesta de la red es predecible en función de la carga.

A continuación se da la fórmula para calcular el tiempo de respuesta:

$$C_c = 8 / S_j \cdot \sum_n L_{mn}(n) + L_{ma}(n) \text{ seg}$$

En donde Cc representa el tiempo máximo de espera de un nodo para acceder la red.

Las longitudes promedio de mensajes normal y alarmas (Lmn y Lma) incluyen la longitud de overhead Lov que es formada por los bytes del mensaje de token, bytes de overhead de cada mensaje así como los tiempos de propagación y tiempo de respuesta del controlador (equivalentes en bytes).



DATOS GENERALES	
Velocidad del bus	5 Mhz
Tiempo de cambio rápido	0.1 seg.
Tiempo de cambio lento	1.0 seg
Long. máx. del mensaje	1024 bytes
Overhead por mensaje	50 bytes
Long. datos analógicos	12 bytes
Long. datos digitales	12 bytes
Long. datos de control	12 bytes
Número de UAD	32
Puntos por UAD	128
Número de UCP	16
Lazos por UCP	16
OPERACION NORMAL	
Puntos de cambio rápido	7%
Puntos en alarma	3%
Puntos de cambio lento	90%
RESULTADOS UAD	
Puntos	243 ptos/seg
Datos	2918 bytes/seg
datos de alarmas	46 bytes/inter
datos de cambios normales	246 bytes/inter
Utilización	20.062%
RESULTADOS UCP	
Puntos	30 ptos/seg
Datos	365 bytes/seg
datos de alarmas	6 bytes/inter
datos de cambios normales	31 bytes/inter
Utilización	3.49%
UTILIZACION TOTAL	23.556%
TIEMPO MAX. DE ACCESO	0.0235 seg

Tabla 6.1: Utilización de la Red (normal)

DATOS GENERALES	
Velocidad del bus	5 Mhz
Tiempo de cambio rápido	0.1 seg.
Tiempo de cambio lento	1.0 seg
Long. máx. del mensaje	1024 bytes
Overhead por mensaje	50 bytes
Long. datos analógicos	12 bytes
Long. datos digitales	12 bytes
Long. datos de control	12 bytes
Número de UAD	32
Puntos por UAD	128
Número de UCP	16
Lazos por UCP	16
OPERACIÓN EN CASO DE DISPARO	
Puntos de cambio rápido	20%
Puntos en alarma	20%
Puntos de cambio lento	60%
RESULTADOS UAD	
Puntos	589 pto/seg
Datos	7066 bytes/seg
datos de alarmas	307 bytes/inter
datos de cambios normales	399 bytes/inter
Utilización	41.295%
RESULTADOS UCP	
Puntos	74 pto/seg
Datos	883 bytes/seg
datos de alarmas	38 bytes/inter
datos de cambios normales	50 bytes/inter
Utilización	4.821%
<b>UTILIZACION TOTAL</b>	<b>46.116%</b>
<b>TIEMPO MAX. DE ACCESO</b>	<b>0.0461 seg</b>

Tabla 6.2: Utilización de la Red (disparo)

### 6.3 Disponibilidad

La disponibilidad de un equipo se define para un período de tiempo T como el tiempo que el equipo opera satisfactoriamente  $T_o$  entre el tiempo T.

$$\text{Disponibilidad} = T_o/T;$$

Cuando el equipo falla es necesaria una reparación, para este caso se define el tiempo promedio de reparación MTTR y el tiempo promedio entre fallas MTBF, la disponibilidad del equipo en función de estas es :

$$\text{Disponibilidad} = \text{MTBF}/(\text{MTBF}+\text{MTTR});$$

Los parámetros MTBF y MTTR son proporcionados por el fabricante de equipos.

Con el fin de evaluar la disponibilidad del sistema de comunicaciones, se hace una representación de el por medio de elementos serie-paralelo. En serie se representan los elementos que deben operar simultáneamente para el éxito de las funciones del sistema y en paralelo los de respaldo.

Para el caso de n elementos en serie la disponibilidad estará dada por:

$$\text{Disp} = \prod_{i=1}^n \text{Disp}_i,$$

Para el caso de n elementos en paralelo la disponibilidad estará dada por:

$$\text{Disp} = 1 - \prod_{i=1}^n 1 - \text{Disp}_i,$$

La topología de red propuesta es un bus, al cual cada una de las UAD, UCP, UIO y UIS están conectadas en forma directa, además se tiene una trayectoria paralela ( bus redundante ) que es usada en caso de falla de la primera. El tener una trayectoria extra de conexión aumenta la disponibilidad del sistema de comunicaciones.

$$\text{Disponibilidad del sistema} = 1 - (1 - \text{Disp1})(1 - \text{Disp2})$$

A manera de ejemplo calculemos la disponibilidad de un sistema de comunicaciones que tiene dos buses de comunicación, cada uno con una disponibilidad del 99%.

$$\text{Disp} = 1 - (.01)(.01) = 99.99\%$$

Disponibilidad	Fuera de Operación		En Operación	
	Días	Horas	Días	Horas
.64	131	10	233	14
.80	73	0	292	0
.95	18	6	346	18
.96	14	15	350	9
.97	10	23	354	1
.98	7	8	357	16
.9801	7	7	357	17
.99	3	16	361	8
.995	1	20	363	4
.997	1	3	363	21
.999	0	9	364	15
.9999	0	1	364	23
1.0	0	0	365	0

Tabla 6.3: Disponibilidad de una Red

En la tabla 6.3 se muestra la disponibilidad como una relación de horas en operación y fuera de operación, para el ejemplo mostrado se tiene que un 99% de disponibilidad significan 3 días con 16 horas fuera de servicio contra 361 días y 8 horas de operación, con dos trayectorias en paralelo se logra 364 días con 23 horas en operación contra 1 hora fuera de servicio.

## Capítulo 7

# Conclusiones

El presente trabajo fundamenta las bases para el diseño e implementación de un sistema de comunicaciones para una aplicación muy particular, el control distribuido de una unidad generadora de una Central Termoeléctrica.

Se analiza las necesidades de comunicación de los usuarios y se establecen los principales parámetros que el sistema propuesto debe cumplir, tiempo de respuesta, disponibilidad, robustez y flexibilidad.

Se propone la manera de alcanzarlos:

- tiempo de respuesta: método de acceso y primitivas de comunicaciones.
- disponibilidad: topología y redundancia.
- robustez: método de acceso y primitivas.
- flexibilidad: método de acceso y topología.

Se estudiaron principalmente los métodos de acceso normalizados, CSMA/CD, Token Passing Ring y Token Passing Bus. El primero método fué descartado para ser usado en la red ya que no brinda un límite máximo en el tiempo de acceso a la red, no maneja prioridades en los mensajes y presenta retardos grandes a mediana carga. Los métodos Token Passing Ring y Bus presentan características muy similares, manejo de prioridades, acceso determinístico al medio, buen tiempo de respuesta con carga variable, sin embargo el mecanismo Token Passing Bus presenta mejores características de disponibilidad y flexibilidad.

Se seleccionó una topología de un solo bus ya que la carga presentada al sistema es baja aún para la condición de disparo, con lo que el sistema puede crecer fácilmente para manejar el doble de las señales iniciales requeridas por el SDCD.

La arquitectura propuesta es compatible con el estándar MINIMAP en el nivel físico y de enlace ( 802.4 ) y a futuro se puede pensar en integrar las diferentes unidades generadoras de una Central Termoeléctrica en una red MAP.

La técnica de evaluación quasi-dinámica del tiempo de respuesta y utilización del medio, es un método rápido de identificación de situaciones críticas de operación de la red, se puede aplicar para una gran variedad de configuraciones y parámetros, también constituye una técnica de comparación de sistemas de comunicaciones con características diferentes.

La evaluación realizada demuestra que el sistema cumple con los tiempos de respuesta y que es realizable. Si como resultado de esta evaluación se hubieran obtenido resultados en donde el tiempo de respuesta se aproximará al tiempo mínimo de reporte se tendría que hacer un análisis más detallado de la propuesta, el que se podría realizar por medio de un modelo matemático o bien usando simulación dinámica, para cualquiera de los dos casos los resultados obtenidos en la evaluación quasi-dinámica, podrían ser usados, lo que reduciría el modelado o simulación.

La arquitectura propuesta constituye el primer paso en la etapa de diseño de un sistema de comunicaciones y muestra la factibilidad de la implantación del mismo.

En este trabajo se muestra como tanto el hardware como el software pueden diseñarse de manera modular, lo que da una gran flexibilidad al SDCC para desarrollos, cambios o interfaces futuras con otros sistemas.

El controlador de comunicaciones es la pieza clave para alcanzar tiempos de respuesta compatibles con el proceso, al manejar de manera concurrente a la aplicación el protocolo de comunicaciones.

La capa de transporte (TTR) propuesta es básica en aplicaciones industriales en donde los principales requerimientos sean el tiempo de respuesta y la robustez.

Los resultados obtenidos de este trabajo están siendo aplicados para la evaluación de la arquitectura de comunicaciones y para el diseño de los programas de la capa de transporte del Sistema Integral de Información del Proceso de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde de la CFE.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

# Bibliografía

- [A1] Le Lann, Gerard  
Distributed Systems-Towards a Formal Approach  
Proceedings of the IFIP Congress, 77
- [A2] Le Lann, Gerard  
Synchronization  
in Lampson 81
- [A3] Le Lann, Gerard  
ON REAL TIME DISTRIBUTED COMPUTING  
INFORMATION PROCESSING 83, INRIA Project SCORE
- [A4] Kramer, J.  
Distributed computer systems: two view's  
in Specification and Design of Software Systems  
LNCS 152, Springer, Verlag, 1983
- [A5] Lampson, B.W.  
Distributed Systems Architecture and Implementation  
LCNS, Springer, Verlag, 1981
- [A6] Lamport, L.  
Time, Clocks and the Ordering of Events in a Distributed Systems  
Communication de ACM, Vol. 21 No 7, july 1978
- [A7] Kohler, W.H.  
A Survey of Techniques for Synchronisation and Recovery in Decentralised  
Computer Systems, Computer Surveys, Vol. 13 no.2 June 1981.

*La nomenclatura usada para enumerar la bibliografía es*

*la siguiente:*

*A para artículos*

*E para estándares*

*L para libros*

*M para manuales*

*R para reportes*

- [A8] Stankovic, John A.  
A Perspective on Distributed Computer Systems  
IEEE Transaction on Computers, december 1984
- [A9] Randell, B., Lee, P.A., Treleaven, P.C.  
Reliability Issues in Computing Systems Design  
Computing Surveys, Vol. 10 No 2, june 1978
- [A10] Liskov, B. and Scheiffer, R.  
Guardians and Actions: Linguistic support  
for robust, distributed programs  
Proc. 9th Symp. Princ. Programming Language, Jan, 1982
- [A11] Kramer, J., Magee J., and Sloman, M.  
Intertask Communication Primitives for  
Distributed Computer Control Systems  
Proc. 2nd Int. Conf. on Dist. Comp. Syst., April 1981
- [A12] Kramer, J., Magee J., and Sloman, M.  
CONIC: An integrated approach to distributed  
computer control systems  
IEEE Proc. Vol. 130 Pt. E, No 1, January 1983
- [A13] Huertas, Alfredo y Lázaro, Carlos  
Buses de Campo. Estado de la tecnología  
Automática e Instrumentación, No 187, Enero 1987
- [A18] Irani Keki B. and Khabbaz Nicolas G.  
A Methodology for the Design of Communication  
Networks and the Distribution of Data in  
Distributed Supercomputer Systems  
IEEE Transaccions on Computers, Vol-C31, No 5, May 1982
- [A19] Schoeffler, James D.  
Response of Industrial Distributed Data  
Acquisition and Control Systems Under Upset Conditions  
ISA Transactions, Vol. 27, No. 2, 1988
- [A20] Tanenbaum, Andrew S. and Renesse, Robert Van  
Distributed Operating Systems  
Computing Surveys, Vol 17, No 4, December 1985



- [A21] Nú José  
Sistemas Distribuidos de Control de Procesos  
Automática e Instrumentación, Informe 87-88
- [A22] Lukas M. P., Dziubakowski D. J., and Schoeffler, J. D.  
The Use of Exception Transmission in a  
High-Performance Distributed Control System  
ISA Transaction, Vol. 23, No. 3, 1984
- [A23] Schoeffler, James D.  
Distributed Computer Systems for Industrial  
Process Control  
COMPUTER, February 1984
- [A24] Vandiver R. L.  
What is distributed control ?  
HYDROCARBON PROCESSING, June 1981
- [A25] Enslow, Philip H.  
What is a Distributed Data Processing System ?  
Computer, January 1978
- [A27] Ansaldo Walter and Olobardi Marco  
Definition and Development of a Protocol for an  
Industrial Plant Control Network  
Local Computer Networks, 1982, North Holland Publishing Co.
- [A28] Prince S.M., B.Sc(Eng)  
Communications requirements of a distributed  
computer control system.  
IEEE proc. Vol 128 Pt.E, No 1 January 1981
- [A29] McGowan, Michael J.  
The Proway Project: Is a Standard Process  
Control Bus in Sight?  
Control Engineering, August 1979
- [A30] Rom, Raphael and Shacham, Nachum  
A Reconfiguration Algorithm for a  
Double-Loop Token-Ring Local Area Network  
IEEE Transactions on Computers, Vol.37, No.2 February 1988
- [A31] Stuck, Bart W.  
Calculating Maximum Mean Data Rate in Local Area Network  
COMPUTER, May 83

- [A32] Shoch, John F. and Dalal, Yogen K.  
Evolution of the Ethernet Local Computer Network  
COMPUTER, August 1982
- [A33] Saltzer, Jerome H. and Clark, David P.  
Why a Ring ?  
CH1694-9/81/0000/0211 \$00.75, 1981 IEEE
- [A34] Ware Myers  
Toward a Local Network Standard  
IEEE MICRO, August 1982
- [A35] Miller, C. Kenneth and Thompson David M.  
Making Case for Token Passing in Local Network  
Data Communications, March 1982
- [A36] Haverlock, Peter M.  
The formula for network immortality  
Data Communications, August 1988
- [A37] Ladvzinsky, Alan J.  
Local Area Networks Expand the Horizons of  
Control and Information Flow  
CONTROL ENGINEERING, July 1983
- [A38] Stalling, William  
LOCAL NETWORK PERFORMANCE  
IEEE COMMUNICATIONS MAGAZINE, February 1984, Vol 22 No 2
- [A39] Stalling, William  
Here is one way to get a close estimate  
of a data links efficiency  
Data Communications, 1986
- [A40] Bartik, Jean  
IBMs token ring: have the pieces finally come together ?  
Data Communications, August 1984
- [A41] Zimmerman, Bochmann y otros.  
SPECIAL ISSUE ON COMPUTER NETWORK  
ARCHITECTURE AND PROTOCOLS  
IEEE Transactions on communications, April 1980 Vol Com-28 No 4
- [A42] Stewart, Neil  
Computer communications for industrial  
automation: the MAP protocols  
Computer communications, October 1988.

- [E1] And American National Standard  
IEEE standars for Local Area Networks :  
Carrier Sense Multiple Access With Collision Detection  
(CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications  
ANSI-IEEE, 1985
- [E2] And American National Standard  
IEEE standars for Local Area Networks :  
Token Pasing Bus Access Method and  
Physical Layer Specifications  
ANSI-IEEE, 1985
- [L1] Allworth, S.T.  
Introduction to Real Time Software Design  
Ed. Mc Millan, 1980
- [L2] Halsall, Fred  
Data Communications, Computer Networks and OSI  
Addison-Wesley Publishing Company, 1987
- [L3] Stalling, William  
LOCAL NETWORKS: Introduction  
MacMillan, 1984
- [L4] Tanenbaum, Andrews S.  
Computer Networks  
Englewood Cliff N.J., Prentice Hall, 1981
- [L5] Doll, Dixon  
Data Communications  
John Willey & Sons, 1978
- [L6] Sloman, Morris and Kramer, Jeff  
Distributed Systems and Computer Networks  
Prentice Hall, 1987
- [L7] Bochmann  
Concepts for Distributed Systems Design  
Springer-Verlay 1983
- [L8] Lukas, Michael P.  
Distributed Control Systems, their evaluation  
and design  
Van Nostrand Reinhold Company, new york
- [L9] Schwarts, Misha  
Information Transmission, Modulation and Noise  
Mc Graw Hill, 1980.

- [M1] PC NETWORK Technical Reference Manual  
IBM Computers, September 1984
- [M2] NETBIOS TC/IP NETWORK SOFTWARE FOR IBM PCs  
EXCELAN, June 1987
- [M3] Bailey Controls  
Applied Digital Research, Inc. 1985
- [M4] Honeywell TDC-3000  
Applied Digital Research, Inc. 1985
- [M5] Foxboro Intelligent Automation Series  
Applied Digital Research, Inc. 1985
- [R1] The Personal Computer Local Network  
Architecture Technology Corporation, August 1986
- [R2] Local Networks Vendors Strategies  
Architecture Technology Corporation, June 1985
- [R3] The Ethernet Type Local Networks  
Architecture Technology Corporation, July 1986
- [R4] Alvares Joaquín, Ricaño Juan Manuel, Garduño Raúl,  
Madrigal José Guadalupe, Ramírez Carlos y García Luis  
ESPECIFICACION FUNCIONAL DE UN SISTEMA DE  
CONTROL DISTRIBUIDO PARA CENTRALES TERMoeLECTRICAS  
NORMALIZADAS Y PROCESOS AFINES  
Instituto de Investigaciones Eléctricas  
Versión preliminar, Junio de 1989.
- [R5] ESPECIFICACION J-100 DE LA C.F.E PARA LA  
INSTRUMENTACION, CONTROL Y AUTOMATIZACION DE CENTRALES  
TERMoeLECTRICAS NORMALIZADAS.  
Comisión Federal de Electricidad, 1982.
- [R6] García G. Luis, Bernal S. Rodrigo, Ríos Gerardo  
Especificaciones para el Subsistema Unidades de  
Adquisición del SADRE Mansanillo II  
Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1988